



OVERVÅGNING AF ENERGIOMKOSTNING SOM KONSEKVENNS AF NEDSAT VARMEVEKSLER- EFFEKTIVITET OG ANALYSE AF OPTIMERINGS- MULIGHEDER

EUDP-projekt 63011-0113

Marts 2011

Anders Mønsted, Teknologisk Institut

Ebbe Nørgaard, Teknologisk Institut

Uffe Thomsen, Teknologisk Institut

Forord

Rapporten er udført i EUDP-projektet: ”*Overvågning af energiomkostning som konsekvens af nedsat varmevekslereffektivitet og analyse af optimeringsmuligheder*”.

Projektet blev udført i perioden fra august 2008 - januar 2011.

Deltagere

Alfa Laval Lund AB
Rolf Christensen

Arla Foods AMBA
Poul Erik Madsen

Enervision A/S
Jesper Wulff Petersen

Færch Plast
Leif Byskov Larsen

Grundfos Management A/S
Thomas Morrison

Grundfos Sensor A/S
Lars Meisner

IPU Refrigeration and Energy Engineering
Morten Skovrup

Johnson Controls (JCI)
Istvan Knoll

Novo Nordisk
Henrik Jensen

Skare Meat Packers
Per Bromerholm

Scanenergi (tidligere Enervice)
Robert Lauridsen

Teknologisk Institut (TI), Life Science, DTI Oil & Gas
Uffe Thomsen

Teknologisk Institut (TI), Energi og Klima, Center for Køle- og Varmepumpeteknik
Anders Mønsted og Ebbe Nørgaard

Marts 2011

Teknologisk Institut, Center for Køle- og Varmepumpeteknik

Resume

Projektets formål var at udvikle en universel algoritme, der med en enkel værdi kunne bruges til at give et udtryk for en varmevekslers effektivitet. Denne værdi skulle ligeledes bruges til at beregne omkostningen ved at have en varmeveksler i drift, som ikke opererer med optimal effektivitet på grund af forurening (fouling) af varmevekslerfladen.

I projektet blev der udvalgt syv forskellige varmevekslertyper ved 5 virksomheder. Disse varmevekslere blev udstyret med energimålingsudstyr, og i løbet af projektet udviklede Grundfos en enhed, som kunne opsamle data og sende dem til en server via et GSM-modul, således at dataene blev tilgængelige for projektgruppen. Udover Grundfos og de 5 demonstrationsvirksomheder deltog Johnson Controls (JCI) i projektgruppen, som i egenskab af køleudstysleverandør, leverer mange køleanlæg med varmevekslere til industrien, samt Alfa Laval, som er en af verdens største varmevekslerproducenter. Endvidere deltog to energirådgivere som skulle opsamle erfaring i forhold til efterfølgende at kunne rådgive virksomhederne omkring energieffektivitet og vandbehandling i varmevekslere. Teknologisk Institut var repræsenteret med to centre. Center for Køle- og Varmepumpeteknik, som havde projektlederrollen og er energi- og varmevekslerexpert, samt Center for Kemi og Vandteknik, som deltog med ekspertise inden for vandbehandling og analyse af fouling.

I løbet af projektet blev det konstateret, at driftsforholdene i de valgte varmevekslere var meget fluktuerende, hvilket stillede store krav til dataopsamling og databehandling. Såfremt alle ændringer skulle opsamles, ville det kræve en dataopsamlingstiming på 10 sekunder, hvilket ville genere så store mængder data, som ikke ville kunne håndteres i det valgte setup. Teknologisk Institut besluttede derfor at udvikle et databehandlingsprogram i et eksisterende datalogningssystem, så der kunne laves kontinuerlig databehandling, hvor datamængden på grund af sortering kunne reduceres til mindst 95%. Dette produkt er blevet afprøvet på Teknologisk Instituts egen varmeveksler med et godt resultat. I løbet af projektet har det ikke været muligt at færdiggøre produktet i en sådan grad, at det kan kommerialiseres, men både Grundfos og JCI arbejder videre med resultaterne.

Projektet har vist at virksomhederne har et behov for fouling detekterings udstyr der kan indikere omkostninger ved fouling. Der er et stort besparelspotentiale ved at installere energiovervågning af varmevekslere, og samtidig kan vandbehandlingen optimeres således, at kemikalieforbruget kan skæres ned til glæde for driftsøkonomien og miljøet. Det har ligeledes vist, at firmaerne ved at installere et energiovervågningsværktøj får øget fokus på at opnå energibesparelser og fastholde disse.

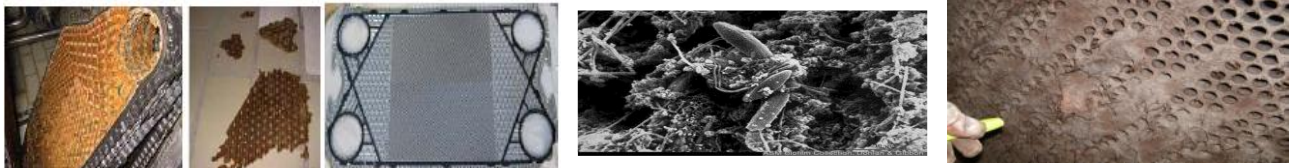
Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	7
2	Foulingbegrebet.....	9
3	Overvågning og vedligeholdelse af kølesystemer i dag	10
3.1	Overvågning af kølesystemer i dag.....	10
3.2	Vedligeholdelse af kølesystemer i dag.....	12
4	Varmevekslere i projektet	13
5	Færch Plast	14
5.1	Veksler 1: Oversvømmet fordampner ved Færch Plast	15
5.2	Veksler 2: Kondensator ved Færch Plast	19
5.3	Vandbehandling ved Færch Plast.....	22
5.3.1	Baggrund.....	22
5.3.2	Materialer og metoder.....	23
5.3.3	Resultater	24
5.3.4	Evaluering af vandbehandling og rengøring af vekslerplader	26
5.3.5	Vandbehandling og CIP.....	27
5.3.6	Anvendelse af filtre.....	28
5.3.7	Konklusion af vandbehandling ved Færch Plast	30
5.4	Konklusion på foulinganalyser ved Færch Plast.....	30
6	Arla Foods	33
6.1	Veksler 4: Dampkondensator	33
6.2	Resultater fra Arla.....	34
7	Veksler 5: Vand/vand-veksler ved Teknologisk Institut.....	36
7.1	Resultater fra TI veksler.....	36
7.2	Vandbehandling og rensning af veksler på Teknologisk Institut.....	37
7.3	Forslag til CIP-procedure på TI-veksler	39
8	Veksler 6: Fordampningskondensator ved Skare Meat Packers	41
8.1	Resultater fra fordampningskøletårn ved Skare.....	42
8.2	Vandanalyser.....	43
8.3	Konklusion på Skare målinger	43
9	Veksler 7: Kondensator ved Novo	44
9.1	Vandbehandlingsaktiviteter på Novo Nordisk.....	44
9.2	Konklusion på Novo analyse	44
10	Udvikling af et system til at overvåge fouling.....	45
10.1	Teknologisk Institut udvikler et værktøj, der kan analysere fouling	45
11	Konklusion på foulingprojektet	48

11.1	Konklusion på overvågningskonceptet	48
11.2	Samlet vurdering af vandanalyserne	48

1 Introduktion

Projektets overordnede mål er at reducere omkostningerne til drift og vedligehold af industrielle kølesystemer samt at udvikle et nyt overvågningskoncept til varmevekslere, som vil gøre driftspersonalet i stand til at vedligeholde varmevekslerne på baggrund af en cost-benefit analyse. Projektet bygger på erfaringer om, at langt størstedelen af alle varmevekslere i bedste fald vedligeholdes med faste rutinemæssige intervaller, og i værste fald overhovedet ikke vedligeholdes. I praksis sker der det, at varmevekslerfladerne tilsmudses over tid, hvilket kaldes fouling. De efterfølgende billeder illustrerer eksempler på fouling.



Billederne viser en plade fra en pladevarmeveksler, der anvender fjernvarmevand. Belægningen er opbygget på få uger. Til højre ses en ren plade.

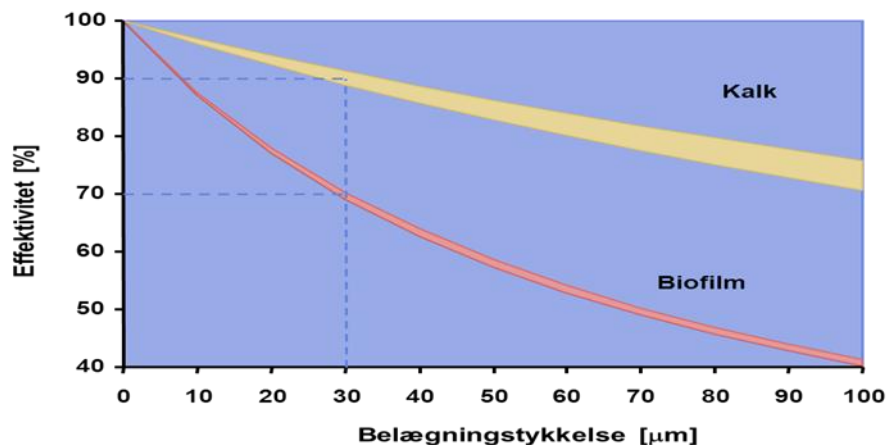
Billedet viser et eksempel på en biofilmbelægning under mikroskop.

Billedet viser en tilstoppet rørveksler.

Figur 1: Eksempler på fouling

Eksemplerne er på ingen måde enestående, men er blot et udpluk af de erfaringer, som Teknologisk Institut har opnået de senere år. Fouling er ikke et nyt og ukendt fænomen, men udgør et problem, som industrien altid har måttet kæmpe med. Projektets formål er at synliggøre problemets omfang og udvikle et nyt værktøj, der på en enkel måde kan bidrage til at reducere omkostningerne ved fouling.

En væsentlig konsekvens af fouling er, at U-værdien reduceres, hvilket resulterer i en lavere overført effekt, eller ændrede temperatur- og/eller flowforhold, som øger energiforbruget. Den efterfølgende figur viser en teoretisk beregning af, hvad dobbeltsidet fouling betyder for varmevekslereffektiviteten, hvad enten det drejer sig om en biofilm eller en kalkbelægning.



Figur 2: Beregninger på effekten af fouling når den findes som biofilm og kalk.

Den store forskel mellem effekten af kalk og biofilm skyldes, at biofilm primært består af vand, som er stillestående. Vand isolerer bedre end et kalklag af samme tykkelse.

Projektgruppen består dels af udstyrsleverandører, som er: Alfa Laval, Johnson Control samt Grundfos Direct Sensor TM og Grundfos Management; Videninstitutterne IPU og DTI; Energirådgiverne Enervision og det tidligere Enervice, samt 4 slutbrugere: Arla Foods Global Ingredients, Skare Meat Packers, Færch Plast og Novo Nordisk.

Ved slutbrugerne overvåges i alt 7 forskellige varmevekslere. Udover udvikling af overvågningen vil der blive arbejdet på at forbedre varmevekslernes effektivitet via bedre systemdesign og ændrede vedligeholdelsesstrategier. Endvidere er det eftervist, at forureningstypen har forskellige indvirkninger på foulingtypen og varmevekslereffektiviteten.

2 Foulingbegrebet

Fouling er årsag til et ekstra energiforbrug. Det gælder alle typer procesanlæg, herunder køleanlæg. Hvor stort merforbruget er, afhænger bl.a. af varmevekslertypen, og hvad de anvendes til.



Figur 3: Her ses et udpluk af varmevekslere, som kan forekomme i et køle-/procesanlæg.

Foulingens indflydelse afhænger af vekslerstype, placering i kredsen, varmevekslerens funktion samt de varmeoverførende medier. Fouling kan inddeles i to typer: en coarse fouling (sten, træ, plastik osv.) og en overfladefouling (scaling, sedimentation, biofouling osv.).

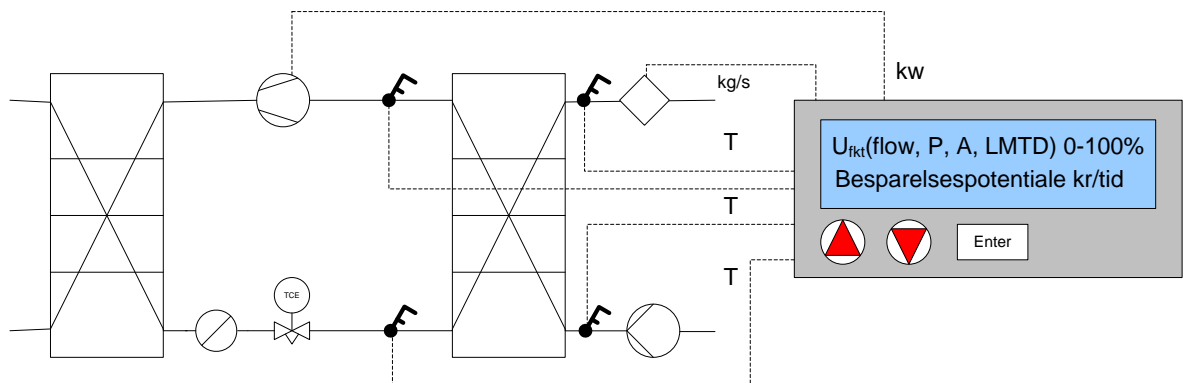
Definitionen på *overfladefouling* er belægninger, som sætter sig på de varmeoverførende flader, hvorved varmefluksen reduceres. Tryktabet øges også, men effekten heraf ses langt senere end den reducerede, overførte effekt, og systemet må derfor ændre temperatursæt for at kompensere for den reducerede U-værdi.

3 Overvågning og vedligeholdelse af kølesystemer i dag

3.1 Overvågning af kølesystemer i dag

Køleanlæggene, der omfatter de varmevekslere, som der fokuseres på i projektet, er generelt udstyret med overvågningsudstyr i form af tryk- og temperatursensorer. Disse kan anvendes til at styre og regulere køleanlægget, og til at vurdere om enkeltkomponenterne virker efter hensigten. Temperatur- og trykforholdene omkring varmeveksleren i køleanlægget (fordamperen eller kondensatoren) kan eksempelvis bruges til at analysere, om der er nok kølemiddel i fordamperen, eller om kølemidlet ”stikker op” i kondensatoren.

Trykdifferenser kan indikere, om der er et højt eller lavt flow, eller om veksleren eventuelt er fyldt med skidt (olie, smuds, kalkbelægninger, biofilm m.v.), men trykfaldet over veksleren skal nødvendigvis holdes op imod flowet for at kunne vurdere, hvad der forårsager et eventuelt højere tryktab. Men ved varierende driftsforhold kan det være vanskeligt på baggrund af de beskrevne målinger at vurdere, om man ser en normal driftsvariation, eller om en given driftsændring er forårsaget af en langsom opbygning af fouling i veksleren. Hvis man skal kunne vurdere det, er man nødt til at kende den overførte effekt. Det kan gøres ved at måle flowet på mindst den ene af varmevekslerens to sider samt ved at kende de fire medietilstande omkring frem- og returløb på veksleren.



Figur 4: Diagrammet viser et eksempel på, hvilke målinger der er nødvendige for at kunne overvåge varmevekslereffektiviteten. Den grundlæggende ide er at kunne beregne og analysere U-værdien.

Beregninger af det relative varmeovergangstal for en vand/vand-varmeveksler

Nedenfor beskrives de udtryk, som ligger til grund for beregningen af den relative U-værdi for vand/vand-varmevekslerne:

Effekten beregnes på baggrund af målinger på den ene af væskesiderne: $Q = V_1 * C_{p1} * dt_1$

Da flowet kun måles på den ene side, beregnes flowet på den anden side: $V_2 = \frac{Q}{C_{p2} * dt_2}$

Varmegennemgangstallet beregnes: $U = \frac{Q}{LMTD * A}$

Størrelsen af U-værdien afhænger primært af strømningens betingelserne på begge sider af varmeveksleren, hvilket kan beregnes analytisk ifølge:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + fouling}$$

Varmeovergangstallene α er primært afhængige af strømningens hastigheder af de varmeoverførende medier opløst i en potens, der varierer mellem 0,6 og 0,8 afhængig af varmevekslertypen.

$$Nu = \frac{\alpha * l}{\nu}$$

Hvor Nusselt-tallet bestemmes empirisk som en funktion af Reynolds-tallet og Prandtl-tallet:

$$Nu = c_1 * Re^{n_1} * Pr^{0,4}$$

Når disse forhold er kendte, kan der korrigeres for begge flow i beregningen af et relativt varmeovergangstal, hvorefter man kan sammenligne den målte/beregnete U-værdi med en teoretisk beregnet U-værdi (U-rel). Ved sammenligning af disse to U-værdier kan man regne tilbage og beregne, hvordan varmeveksleren ville have virket, hvis den havde virket optimalt.

Relativ varmeovergangstal: $u_{rel} = \frac{U}{\left(\frac{1}{\nu_1^{0,8}} + \frac{1}{\nu_2^{0,8}}\right)}$

I et vand /vand-køleanlæg er effektiviteten udtryk for den effekt, der afsættes i kølekredsen i forhold til den energi, der bruges til at cirkulere vandet. Da køleeffekten er produktet af vandflowet og temperaturdifferensen, er den eneste måde, hvorpå effektiviteten i anlægget kan øges, ved at øge temperaturdifferensen og dermed sænkes flowet og effektforbruget i relation til dette.

Beregning af det relative varmeovergangstal for en kølemiddelveksler

Beregningerne i en kølemiddelveksler er lavet ud fra følgende betragtninger, som er fremkommet i løbet af dette projekt:

- Køleanlæggene i dette projekt er begge stempelkompressorer, der reguleres med trinindkobling, og det blev vurderet, at datagrundlaget var bedst, når der kun blev udført beregninger med 100% kompressorlast.
- Det blev ligeledes vurderet, at kølemiddelflowet ikke havde nogen nævneværdig betydning for korrektionen i forhold til flowfaktoren. Denne konklusion blev taget efter målinger af kølemiddelflowet på Færch-fordamperen.
- Endelig blev det ved målinger på Færch Plast konstateret, at kølemiddelflowet i den selvcirkulerende kreds var rimeligt konstant ved fuldlast, og flowmålinger på kølemiddelsiden på en væskkøler er derfor ikke nødvendige.

Den relative U-værdi korrigeres derfor kun for flow på vand/brine-siden: $u_{rel} = \frac{U}{\left(\frac{1}{v_{vand}}\right)}$

I et køleanlæg er effektfaktoren utrykt som COP (Coefficient Of Performance), som er kuldeydelsen divideret med effekten, der er optaget af kompressormotoren.

$$COP = \frac{Køle\ effekt}{Kompressor\ effekt}$$

I princippet skulle pumpeeffekten indregnes i denne værdi, da den har en betydning på anlæggets samlede effektivitet, men det er ikke normal praksis, og derfor medtages den værdi heller ikke i dette projekt.

I fordamperen vil fouling føre til, at anlægget skal være i drift med lavere fordampningstemperatur, og derved vil kompressoren have lavere ydelse men bruge den samme effekt. Dette fører til lavere COP.

I kondensatoren vil fouling betyde en højere kondenseringstemperatur, som vil føre til højere effektforbrug men ikke nødvendigvis mindre køleydelse. Dette fører også til en lavere COP, men effekten af dette er af mindre betydning for COP end i fordamperen.

3.2 Vedligeholdelse af kølesystemer i dag

Der findes et utal af kemikalier, der anvendes i vandsystemer for at holde styr på korrosion og mikrobiologi. Der findes også mange forskellige filtreringsteknologier, der anvendes i mange afskygninger. Hvert vandsystem har ofte forskellige behov, som vandbehandlingsfirmaerne er gode til at identificere, men den daglige drift og overvågning af systemerne er i sidste ende overladt til virksomheden selv. Teknologisk Institut har flere gange oplevet, at doseringen af kemikalier ikke har været optimal, hvilket har medført uheldige driftsmæssige konsekvenser. Så det optimale system har fundet en god balancegang mellem overvågning, dosering af kemikalier og filtrering. I behandlingen af de enkelte demonstrationscases vil dette emne blive nærmere behandlet.

4 Varmevekslere i projektet

Ved udvælgelsen af vekslerer til dette projekt har der været fokus på, hvilken applikation de har indgået i, og hvilke muligheder, der har været for at fjernovervåge vekslerne. Det har ligeledes været vurderet, hvordan vedligeholdelsesprogrammet for varmeveksleren har været, og hvilken vedligeholdsmæssig tilstand vekslerne var i ved målingens start. Det var vigtigt, at der var et eksisterende vedligeholdesskema for varmevekslerne, således at der ville kunne spores en forbedring ved en optimering af vedligeholdelsesprogrammet.

I forbindelse med udvælgelse af vekslerne har det været vigtigt at vurdere, om der var eksisterende måleudstyr, som har kunnet bruges til dataopsamlingen. Det var tilfældet i flere af systemerne, hvor eksisterende måleudstyr kunne bruges. Dette har specielt været vigtigt på systemerne med ammoniak, hvor det er vanskeligt og dyrt at eftermontere måleudstyr i kølemiddelkredsen, da det oftest vil betyde, at ammoniakken skal evakueres, og at der vil skulle svejses på anlægget. Det er både en dyr og tidskrævende metode, og på de fire anlæg, som indeholder ammoniak, er det lykkedes at bruge eksisterende måleudstyr i de fleste tilfælde. Undtagelserne på de enkelte installationer er beskrevet i afsnittene for de enkelte demonstrationsvirksomheder.

For at opnå det mest komplette billede af, hvordan fouling påvirker varmevekslereffektiviteten, er der i projektet fokuseret på at finde forskellige typer varmevekslere.

Derfor er følgende vekslerer blevet udvalgt til måling og evaluering ved de deltagende slutbrugere:

	Anvendelse	Location	Medie primærside	Medie sekundærside	Vekslerstype	Andet
1	Fordamper	Anlæg 9006 Færch Plast	Ammoniak	Vand i lukket kreds	Pladevarmeveksler	
2	Kondensator	Anlæg 9006 Færch Plast	Ammoniak	Grundvand	Pladevarmeveksler	Grundvandskølet, lukket tørkølerkreds
3	Varmegenindvinding	Færch Plast	Vand	Vand	Rørbundtsveksler	To lukkede kredse. Taget ud af drift inden der kom resultater
4	Kondensator	Arla Food	Vanddamp	Vand i åbent køletårn	Rørbundtsveksler	Vandet i køletårnet er kondensatet
5	Proceskøl	TI	Vand i lukket kreds	Køletårnsvand	Pladevarmeveksler	Køletårnet spædes med blødgjort grundvand
6	Kondensator	Skare	Ammoniak	Luft og vand	Fordampningskondensator	Køletårnet spædes med blødgjort grundvand
7	Kondensator	Novo	Ammoniak	Køletårnsvand	Pladevarmeveksler	Køletårnet spædes med søvand

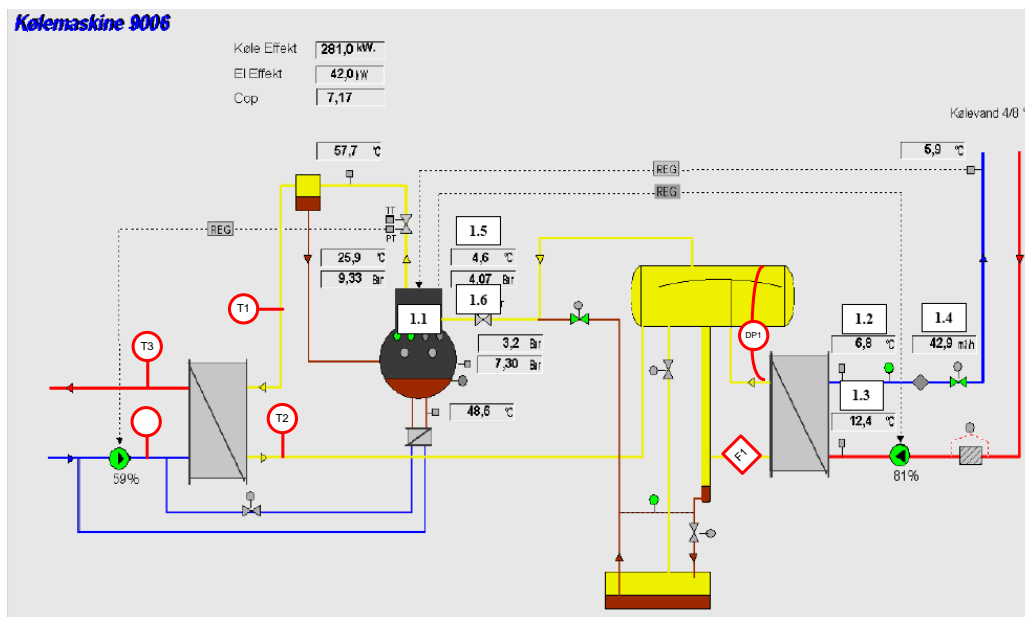
Tabel 1: Varmevekslere udvalgt til overvågning i foulingprojektet.

5 Færch Plast

Færch Plast er en plastproducerende virksomhed i Holstebro, der leverer plastemballage til fødevarerindustrien. Færch Plast har gennem flere år arbejdet intensivt på at opnå energibesparelser, og har haft gode resultater på dette område. Det har blandt andet betydet, at der har været tradition for at måle grundigt på kølesystemerne, for derved at kunne følge udviklingen i energieffektiviteten. På alle køleanlæggene er der Styrings-, Regulerings- og Overvågningsudstyr (SRO), og dataene fra disse systemer har efter nogle mindre justeringer af dataopsamlingsprotokollen kunnet bruges direkte i projektet. Det har derfor kun været nødvendigt at montere to målesystemer på kølemiddelsiden ved fordamperen, og disse målinger kunne tilknyttes det eksisterende SRO-system. For projektet har det betydet, at der har været måledata af en god kvalitet til rådighed for energianalysen meget tidligt i projektføløbet. Det har dog været nødvendigt at justere på datalogningssystemet, da der til brug af visualisering er lavet en databehandling af værdierne, som giver et bedre overblik over driften i forbindelse med overvågning. Denne databehandling gjorde, at dataene til energiberegning ikke var valide og databehandlingen i SRO-systemet måtte derfor ændres. På grund af dette har valide data først været tilgængelig fra den 18. april 2009.

Der eksisterer to kølevandssystemer benævnt hhv. 14/21 °C kondensator kredsløb og 4/8 °C kølekredsløb på fabrikken, indeholdende et vandvolumen på hhv. 35 og 39 m³. De to systemer tilføres spædevand med hanevand, der har passeret et blødgøringsanlæg. Desuden var der monteret et 5 µm posefilter, som udskiftes efter behov.

Nedenfor ses procesdiagrammet for det anlæg, som bruges i energiovervågningen, og det er i hovedtræk dette anlæg med betegnelsen 9006, der behandles i de følgende afsnit. I projektperioden skete der et brud på en kondensatorplade i et tilsvarende køleanlæg benævnt 9007, og denne plade er brugt til foulinganalysen, som er beskrevet i afsnit 5.3



Figur 5: Procesdiagram for kølesystem for 9006.

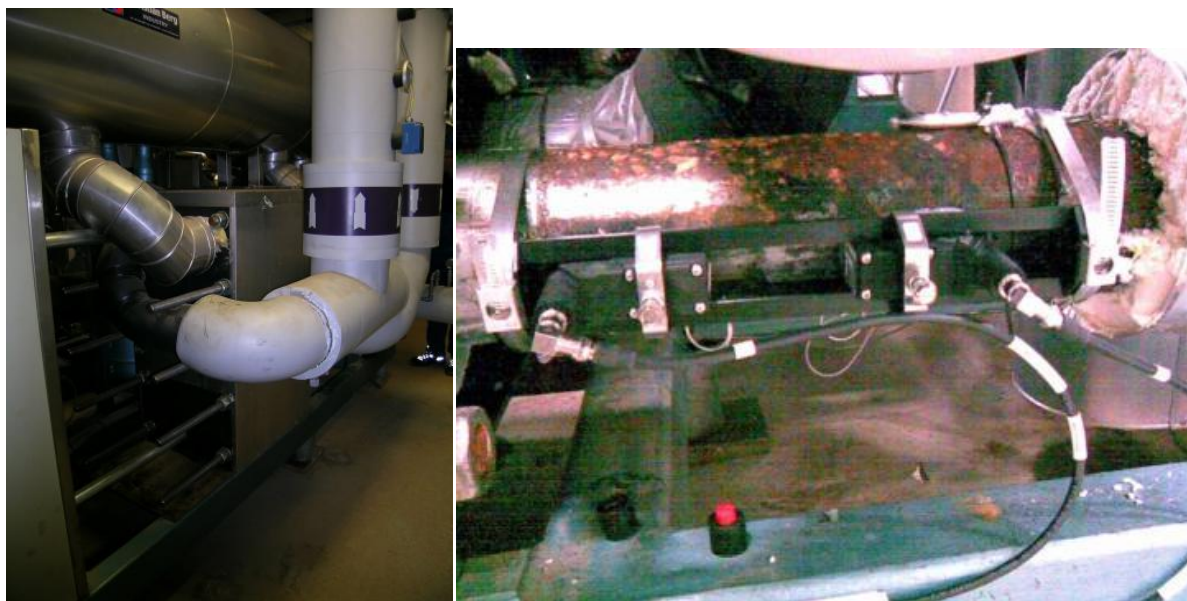
5.1 Veksler 1: Oversvømmet fordampner ved Færch Plast

Kølevandet i denne proces bruges til køling af plastekstrudere og andet procesudstyr. Kølevandskredsen cirkuleres i hele produktionen, og vandet kan blive udsat for flere forureningskilder. Ligeledes vil kølemiddelsiden blive ”forurenset” af olie. Varmevexleren er en pladeveksler, leveret af Alfa Laval, og beregnet til at levere 240 kW ved 13/7 °C vand. Det oprindelige design på fordampneren var beregnet med vandtemperaturer på 4/8 °C. Det er lykkedes Færch Plast at øge temperaturen i vandkredsen, således at kølebehovet i plastmaskiner kan dækkes med en fremløbstemperatur på mellem 7-8 °C. Denne øgning af fremløbet giver en **forbedring af effektivitetsfaktoren (COP) på kølekredsen på 17,7%**.

Dette viser, hvor meget der kan spares, hvis vandkredsen og kølesystemerne i hele kredsen vedligeholdes og optimeres, således at der kan køles med så høj temperatur som muligt. Energieffektiviteten ved Færch Plast har været meget høj allerede inden projektet gik i gang, og derfor forventede man ikke at se store effektivitetsforbedringer.

Vexleren rengøres normalt ikke, men kølevandskredsen er blevet sæberenset i foråret 2008. Vexleren er udvalgt til projektet, fordi der findes rigtig mange af den pågældende slags varmevexlere i det industrielle segment, og ikke fordi der har været særlige problemer med den pågældende vexler.

Der vil være særlig fokus på ammoniakksiden omkring olieproblematikken og for at kunne overvåge dette, er der monteret en ultralydsflowmåler på kølemiddelsiden (F1). Denne flowmåler er valgt, da den kan monteres uden på røret og kan dermed installeres, uden at der skal laves indgreb på ammoniakksiden. Det er dog en dyr måleenhed, som også kræver en specialiseret viden for at kunne monteres på anlægget. Det vil derfor ikke være den type flowmåler, der vil blive anbefalet, såfremt projektet viser, at der skal måles flow på ammoniakksiden. Endvidere er der monteret en differenstrykmåler i den våde retur fra fordampneren til væske-separatoren. Dette er for at kunne analysere sammenhængen mellem ammoniakksidens cirkulationstal og ydelsen på fordampneren. Det er vigtigt at kende disse parametre for at vurdere betydningen af parametrene på ammoniakksiden i forhold til foulingen.

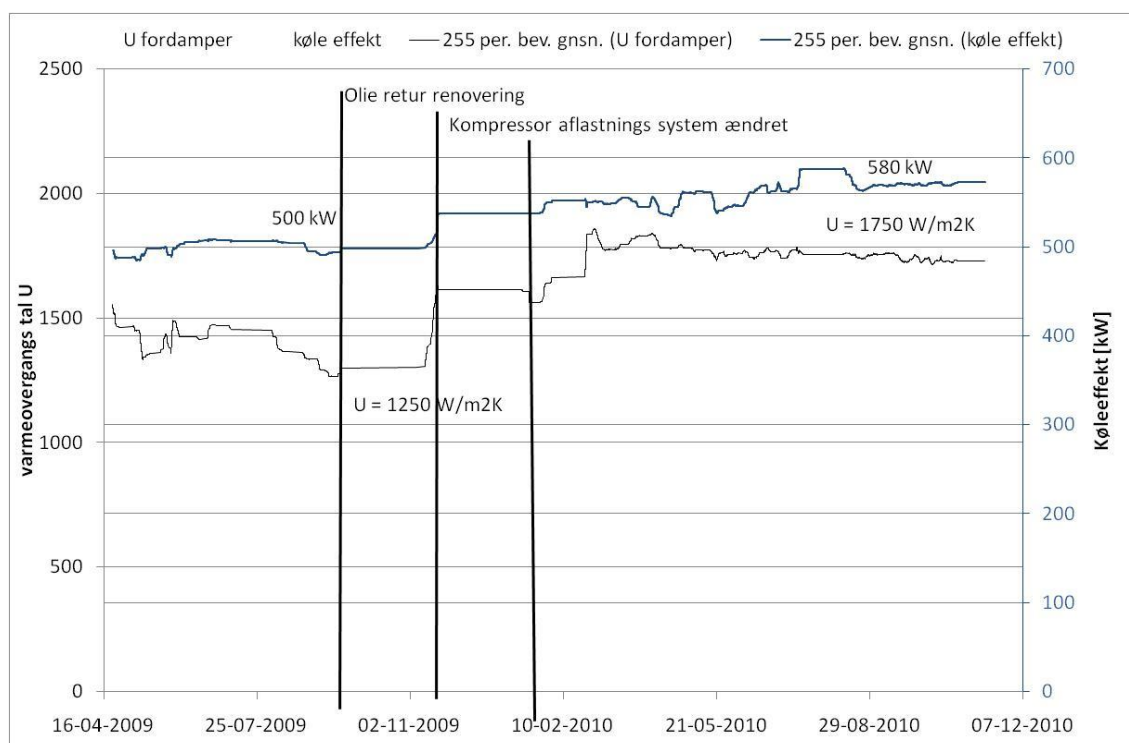


Figur 6: til venstre: fordampner med vandtilslutninger. Til højre: ultralydsflowmåleren.

Resultater for fordamperen på 9006

I løbet af projektet besluttede Færch Plast, at køleanlægget skulle renoveres. Renoveringen omfattede kompressoren, som skulle serviceres samt olieretursystemet fra fordamperen, som blev vurderet til ikke at være tilstrækkelig effektiv. Anlægget blev derfor taget ud af drift i perioden fra primo oktober 2009 til medio november 2009. I samme periode blev fordamperen rensset (CIP) med en specifik renevæske designet af TI's specialister inden for vandbehandling på baggrund af analyser af kølevandet.

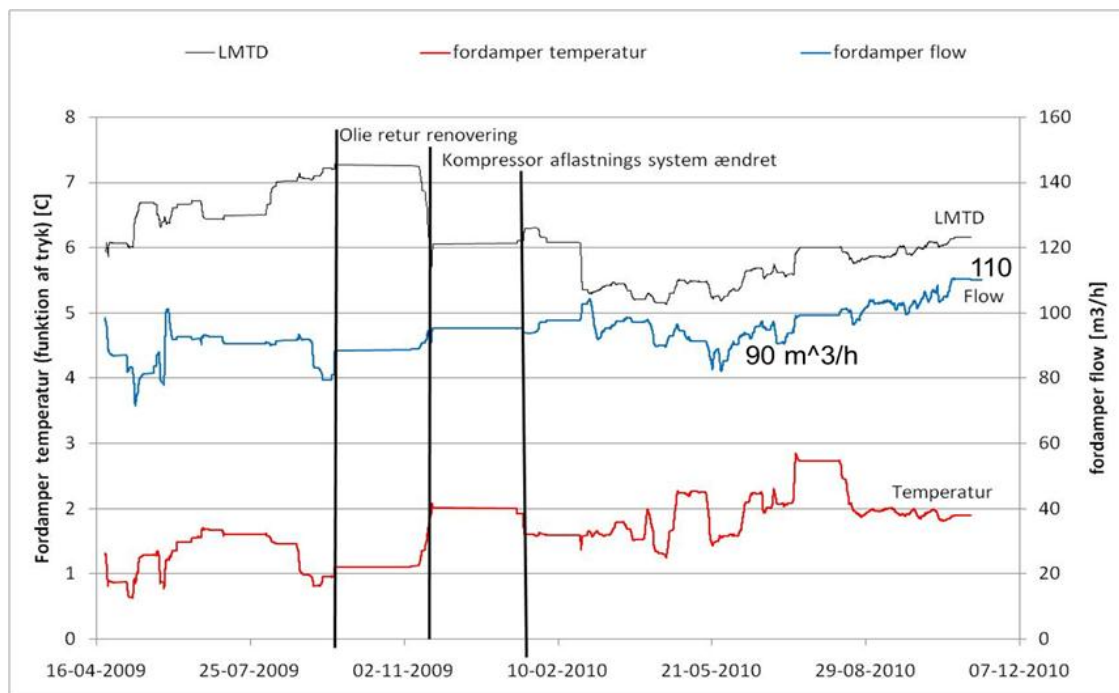
Da anlægget blev startet op efter renovering, blev det dog konstateret, at der var en fejl på olieafkastningssystemet. Fejlen betød, at der kom olie direkte ind på cylinderne i kompressoren og dermed ud i anlægget. Mængden af olie var større end det olieudskilleren er dimensioneret til, og der er derfor kommet et ukendt antal liter olie ud i anlægget. Anlægget blev taget ud af drift, og kompressoren blev repareret, hvorefter anlægget blev genstartet. Betydningen for kondensatorkredsen er beskrevet i afsnittet om kondensatoren.



Figur 7: Fordampereffekten og varmeovergangstallet.

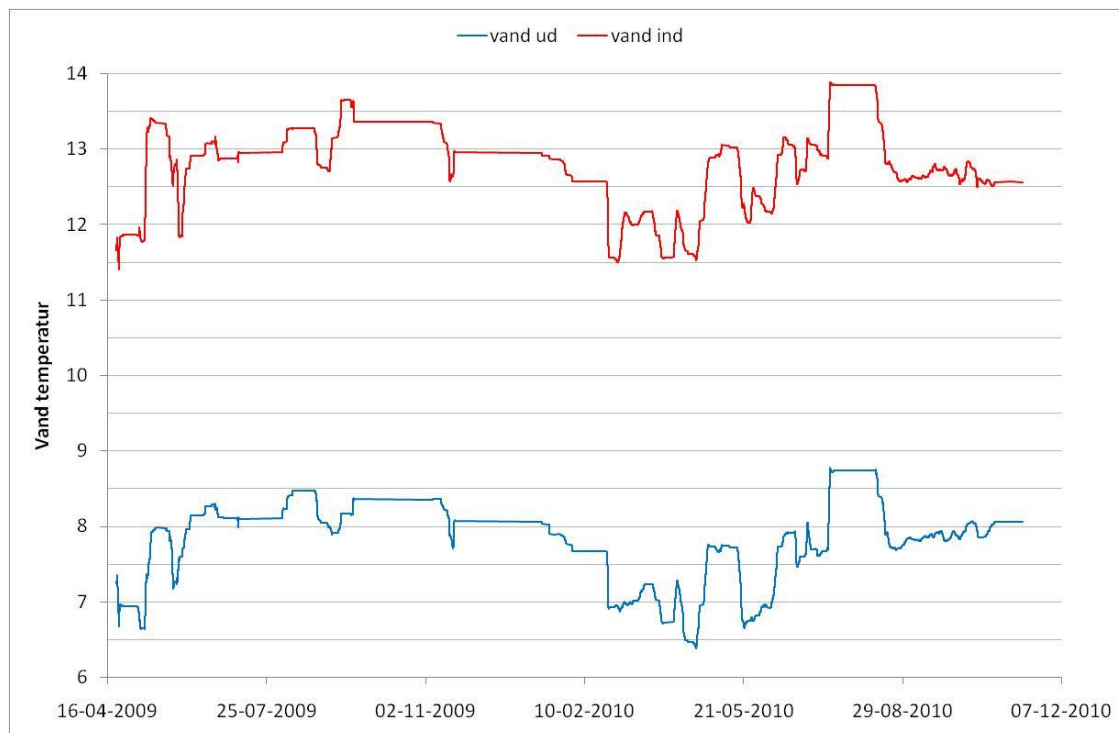
Ovenstående figur viser tydeligt, at den optimerede olietur har ført til et forbedret varmeovergangstal efter renoveringen, og efter nogle måneder, hvor olien langsomt er vasket af fordamperfladerne, er effekten steget fra 500 kW til 580 kW svarende til 16%.

I driftsøkonomiske termer er det vigtigt, at LMTD er så lav som muligt, hvilket sikrer, at kompressoren kan operere ved så høj en fordampningstemperatur som muligt og dermed øge COP. I køleanlæg er der en meget tydelig sammenhæng mellem fordampertemperatur og anlæggets effektivitet, og hver grad øget fordampertemperatur øger anlægseffektiviteten med 4%.



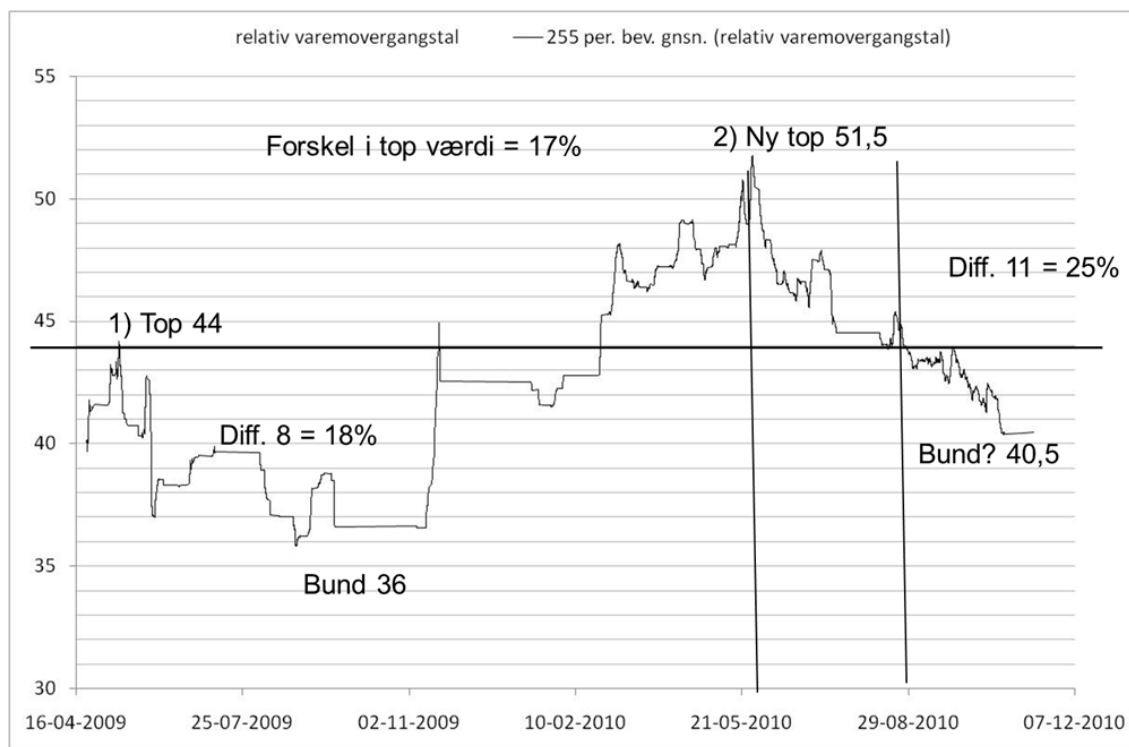
Figur 8: Fordampertemperatur, flow og LMTD i perioden.

For at der kan afsættes mere effekt i systemet er pumpe flowet øget på vandsiden og samtidig er vandtemperaturen omtrentlig holdt konstant som det ses af nedenstående graf.



Figur 9: Vandtemperaturerne ind og ud af fordamperen.

De foregående 4 grafer viser, at der er store udsving i de målte parametre, som ikke kan afkodes ved bare at se på anlæggets afgivne køleeffekt eller effektivitet. I et køleanlæg, der opererer under skiftende driftskonditioner og behov, kan det være vanskeligt at gennemskue, hvilke forhold, der påvirker effektiviteten, og hvor meget fordampere er foulet til uden først at beregne U-værdien og forholde den målte/beregnete U-værdi med en teoretisk beregnet U-værdi under de givne driftsbetingelser. I nedenstående graf ses den relative U-værdi, der viser tilstanden af fordampere, når der korrigeres for variationer i flow og temperaturer.



Figur 10: Den relative U-værdi.

Det ses tydeligt, at fordampere opnår en optimal effekt, 5 måneder efter at oliereturssystemet er optimeret. Det viser, at olie er vanskeligt at opløse i en fordampere, og at det kan have en stor effekt.

Konklusion på Færch-fordampere

Oliesystemet er blevet renoveret, hvilket medfører en forbedring af fordampere effektivitet:

- Varmegennemgangstallet U er steget fra 1250 til 1750 W/m²K.
- Den bedre performance på fordampere har ført til, at anlægget kan levere højere ydelse.
- Fordampertemperaturen er steget fra ca. 1 °C til 2 °C, hvilket giver en effektfaktorforøgelse på 3,8%.
- Hvilket medfører, at køleanlæggets ydelse stiger fra 500 kW til 580 kW = 16%.

Omkostning ved fouling:

- Efter renovering er toppunktet for den relative U-værdi steget med 17%.
- Der er en sammenhæng til den forøgede effekt, og derved kan udtrykket for det relative varmeovergangstal kobles sammen med besparelsen.
- Omregnet til et forøget elforbrug giver en procent point forbedring på u_{rel} en besparelse på 1500 kr./år.

Beregning af besparelse ved at udføre en CIP:

- Beregning på optimeringen af oliereturen giver et besparelspotentiale på 25.500 kr./år.
- Besparelsen ved at gennemføre en CIP på veksleren, når u_{rel} er faldet 8 procentpoint, er 27.000 kr./år .
- Det vurderes, at fordamperen skal CIP'es hvert $\frac{1}{2}$ år ved normal drift i en optimal situation!

Beregningerne på anlægget er dels lavet i anlægsberegningsprogrammet COMP1 fra JCI og i en Ees beregningsmodel for varmevekslereffektivitet.

5.2 Veksler 2: Kondensator ved Færch Plast

Kondensatoren indgår i samme køleanlæg som veksler 1, og køles med en lukket vandkreds, som filtreres og doceres med biocid. Vandet køles i en lukket kreds med grundvand. Varmeveksleren er en pladeveksler, leveret af Alfa Laval, og beregnet til at levere 300 kW ved 18/26 °C vand. Veksleren er ikke blevet rensat efter ibrugtagning af køleanlægget. På grund af et højere temperaturniveau set i forhold til fordamperkredsen, viser erfaringerne, at der er større tendens til fouling på denne veksler end på fordamperen.

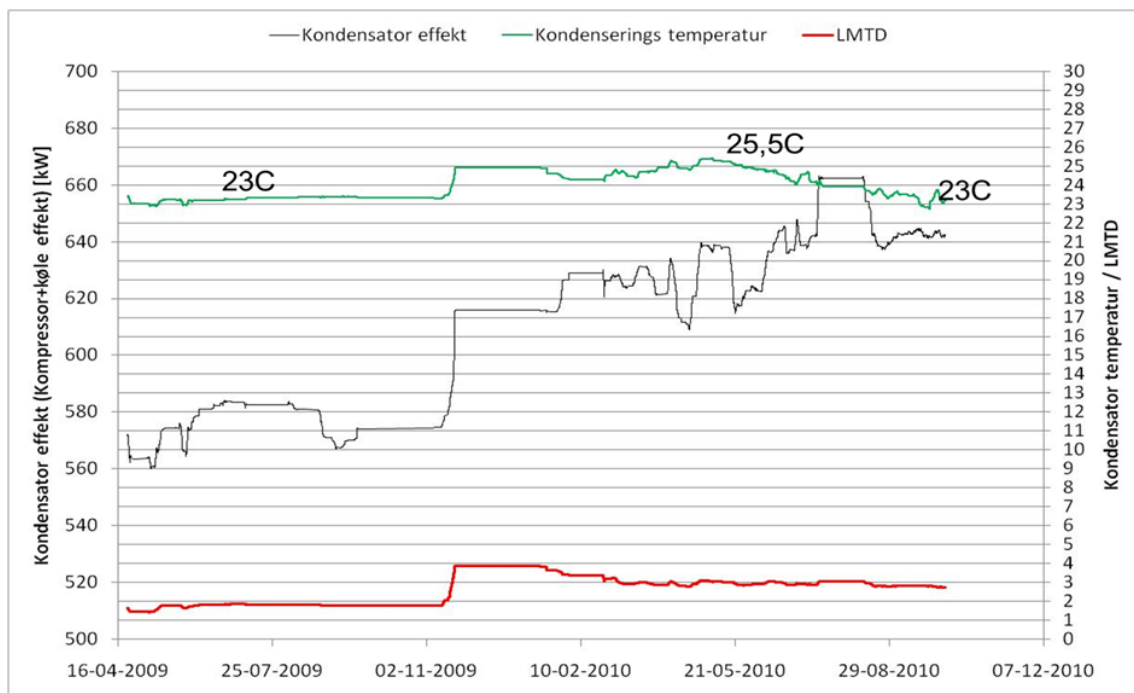


Figur 11: Kondensator ved Færch Plast.

Resultater for veksler 2

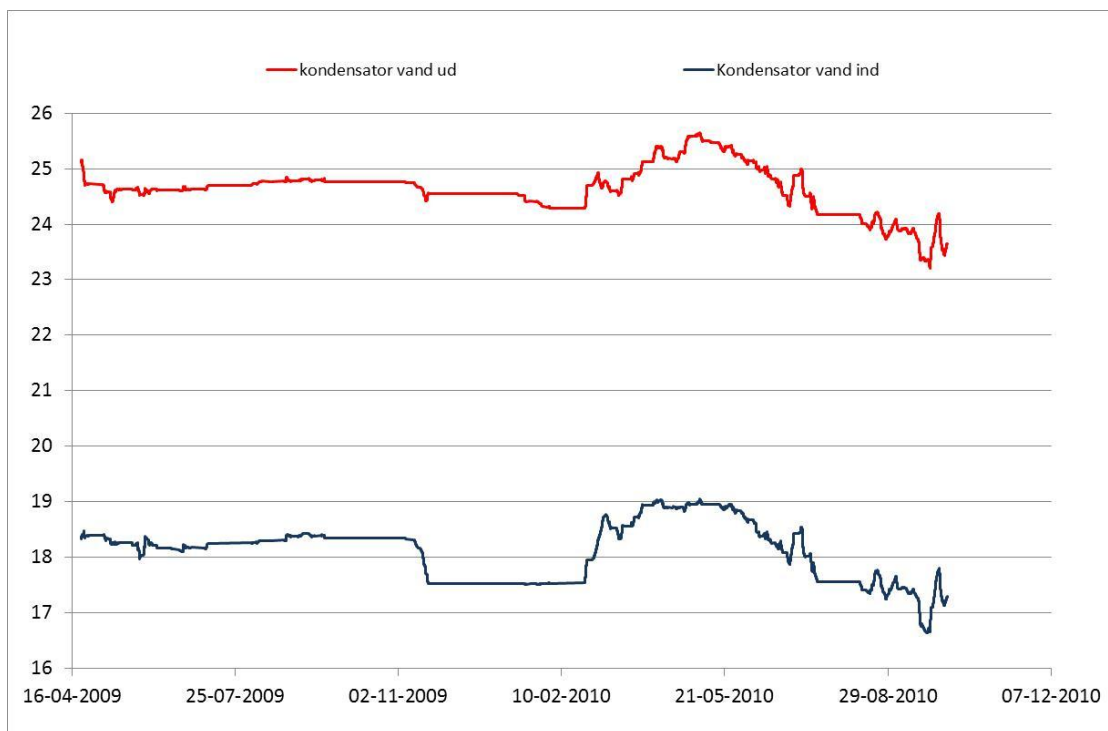
På kondensatoren er der ikke installeret flowmåling på vandkredsen, og effekten blev derfor bestemt ved at lægge motoreffekt og køleeffekten sammen. Dette giver en værdi, der er meget tæt på den afgivne effekt, når der ses bortset fra tab til omgivelserne. Måleteknisk er det dog ikke optimalt, da usikkerheder og dynamiske svingninger i driften, og dermed de målinger, der skal bruges til beregningerne, vil give større udslag i denne beregning. Det er derfor tilrådedigt at lave en flowmåling på kondensatorvandkredsen og bestemme kondensatoreffekten heraf.

De efterfølgende resultater vil blive kommenteret i forhold den ombygning af oliesystemer og renovering af kompressoren, som er beskrevet i starten af afsnit 5.

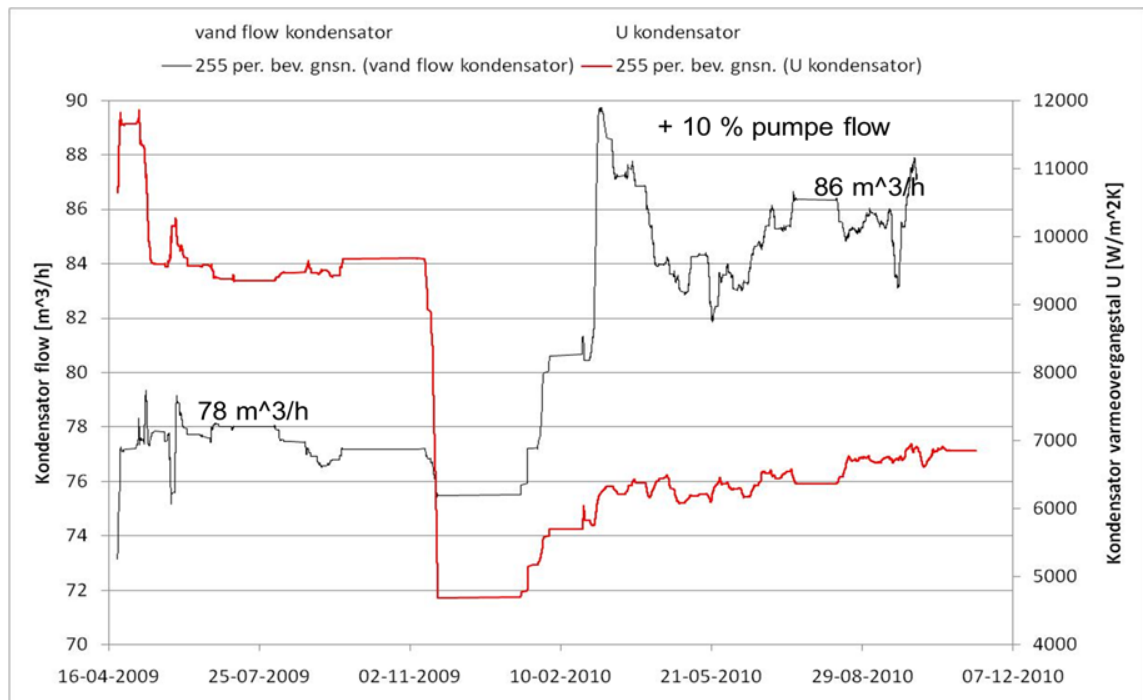


Figur 12: Kondensatoreffekt, kondenseringstemperatur og LMTD.

Den øgede effekt i kølekredsen giver en øget effekt i kondensatoren, og umiddelbart stiger kondenseringstrykket. Når det sammenholdes med temperaturen på vandsiden, skyldes en del af denne stigning også, at vandtemperaturen er steget i perioden efter renoveringen.

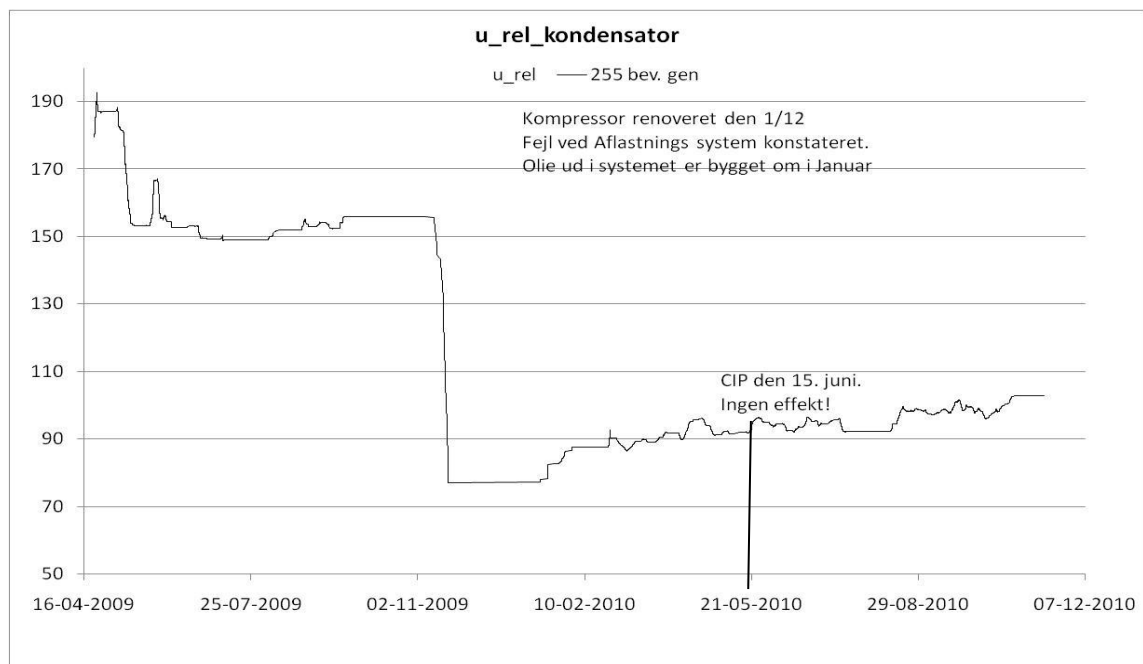


Figur 13: Kondensatorvandtemperaturer.



Figur 14: Pumpeflow og varmeovergangstal.

Ovenstående figur viser, at varmegennemgangstallet falder fra ca. 9500 til ca. 5000 W/m²K efter renoveringen. U-værdien falder på trods af, at flowet øges, og det øges hovedsageligt pga. den forøgede køleeffekt.



Figur 15: Beregninger på det relative varmeovergangstal på kondensatoren viser et stort fald efter olieforureningen af kondensatoren, som kun langsomt forbedres.

Det ses af ovenstående figur at det relative varmeovergangstal faldet fra ca. 155 før af anlægget til ca. 80 efter oliesystemet er genetableret, hvilket viser at der er sket en forurening af veksleren. En CIP-rengøring af kondensatoren på vandsiden med en speciel blanding rettet mod de fundne jernoxider, havde ikke nogen effekt på effektiviteten, og dette bekræfter, at fouling sker på ammoniaksiden (se afsnit 5.3).

Konklusion på kondensatordata

For kondensatoren er der kun sket en mindre forbedring, og den mangler stadig 44% i at nå det optimale varmeovergangstal = Merforbrug på 5,2 kW (COMP1) = 18.200 kr./år.

Dette viser klart, at en olieforurening i en ammoniak-kondensator har ganske stor betydning, og at denne kun meget langsomt genetableres. Det har i projektet været ønsket, at der blev lavet en specifik rensning af ammoniaksiden, men dette har ikke været muligt i projektperioden.

5.3 Vandbehandling ved Færch Plast

5.3.1 Baggrund

I Færch Plasts køleanlæg anvendes forskellige vandbehandlingsmidler til at modvirke vækst af bakterier og til at modvirke korrosion. I forbindelse med projektet blev der etableret online energiovervågning af varmevekslernes effektivitet. Samtidig har det i forbindelse med udskiftning af vekslerplader fra et af kølesystemerne været muligt at analysere belægninger (fouling) på en vekslerplade. Dette har givet unikke muligheder for at forstå foulingmekanismerne i kølesystemer og dermed mulighed for at finde optimeringstiltag til en bedre energiuudnyttelse. I projektet er der arbejdet med to kølesystemer hhv. 13/15-grader systemet med en kondensator varmeveksler 9007 og 4/8-grader systemet med kondensator varmeveksler 9006.

Sidestrømsreaktor

På returledningen til 4/8 °C systemet blev en sidestrømsreaktor (foulinggenerator) påmonteret med henblik på at genskabe den belægningsdannelse (fouling), som sker på vekslerpladerne. I reaktoren blev isat kuponer af rustfrit stål, som efterfølgende kunne udtages fra reaktoren til analyse. En rotor i reaktoren roterede med en hastighed svarende til en vandstrøms hastighed på 1 m/sek. Kuponer blev isat og reaktoren startet med gennemstrømning den 14. august 2009.

Sidestrømsreaktoren blev monteret på 9006 fordamperen, og den blev senest CIP'et i efteråret 2009. Der kunne dengang ikke umiddelbart ses nogen effekt på varmetransmissionen. Der er i løbet af projektet etableret detaljeret energiovervågning på denne veksler.

Generelt er problemstillingen vedrørende fouling i det pågældende system, at der dannes rødlige belægninger af jernoxider, at bakterieniveauet til tider er ekstremt højt, at der cirkulerer store mængder partikler og at der sker korrosion af metaller i systemet.

Til afrensning af fouling fra vekslerplader anvendes CIP-væsker, og dette foretages normalt som en ad hoc-opgave. I Færchs køleanlæg anvendes desuden forskellige vandbehandlingsmidler til at modvirke vækst af bakterier og til at modvirke korrosion. Effekten af ovenstående vandbehandlinger er ikke tidligere belyst, og dette indgår som del af ovenstående projekt.

Der skal gives en vurdering af bakterieforekomsten i to køleanlæg og den anvendte vandbehandling. Desuden evalueres effekten af rensning af en varmeveksler.

5.3.2 Materialer og metoder

Analyse af vekslerplade. Fra varmeveksleren 9007 blev der i september 2009 foretaget serviceeftersyn, og samtidig blev der udtaget en vekslerplade. På pladen blev der konstateret rødlige belægninger på de to vandsider, som efterfølgende blev afskrabet til analyse. Belægningshøjden blev målt med digital billedbehandling. Afskrab af belægningen blev analyseret med røntgenanalyse til bestemmelse af elementar-sammensætning, og total organisk stof blev bestemt med oxidation og infrarød spektrofotometri (TOC-analyser).

Clean-in-Place (CIP)

Rensning af kondensatorveksler 9006 blev foretaget den 15. juni 2010. Der blev på Teknologisk Institut fremstillet 100 liter oxalsyre 0,2 M pH 3 til opløsning af de jernoxider, der var aflejret på vekslerpladerne. Det nødvendige volumen til CIP var cirka 45 liter til veksleren og samme volumen til en ekstern beholder med en pumpe til at cirkulere CIP-væsken. Rensning af veksleren blev foretaget efter nedenstående procedure:

1. Veksleren blev tømt for procesvand.
2. Veksleren blev gennemskyllet med rent vand for at konstatere, om der var slam i veksleren.
3. Veksleren blev herefter påfyldt oxalsyre 0,2 M pH 3, og det blev tjekket, om udløbsvandet var nær neutral pH. Oxalsyren recirkuleredes i 4 timer ved rumtemperatur.
4. Anlægget blev til sidst skyllet igennem med 5 hold vand.

Kølevandsprøver

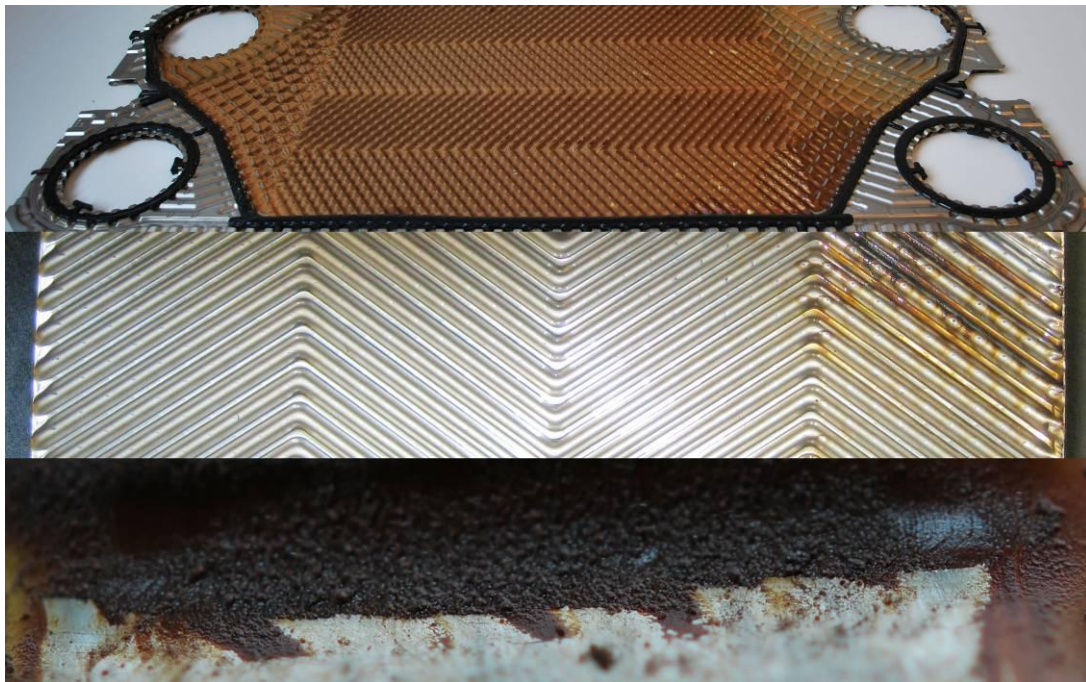
Der blev udtaget prøver fra returledningen på to kølesystemer, første gang i 13/15 °C den 8. april 2010 og fra 4/8 °C den 15. april 2010. Prøverne blev udtaget i sterile 250 ml flasker (IQ-kits) og herefter sendt til Kemisk og Mikrobiologisk Laboratorium, Teknologisk Institut. Prøverne blev konserveret senest dagen efter prøveudtagningen. Total bakterietal blev bestemt med epi-fluorescens mikroskopi og *Eubakterier*, *Arkebakterier* og *Legionella* blev analyseret med kvantitativ PCR (qPCR). Det skal bemærkes, at 4/8 °C systemet var blevet genfyldt med hanevand 5. april 2010, og kølevandet var derfor forholdsvis nyt.

5.3.3 Resultater

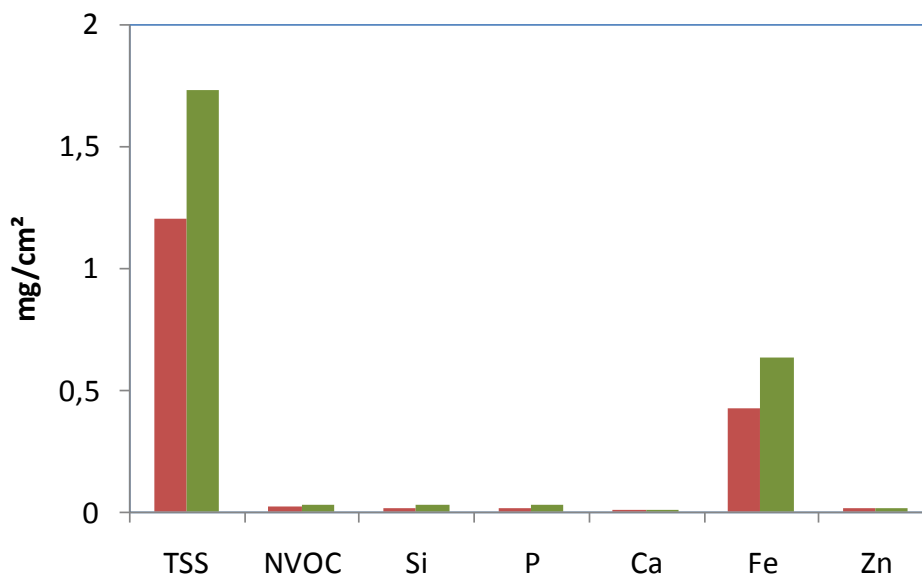
Vekslerpladeanalyser og effekt af CIP

Udtagning af en vekslerplade giver det bedste billede af de aflejringer, som opbygges på overfladen i driftsperioden. Hermed kan belægningstykkelsen bestemmes, og sammensætningen af belægningen kan analyseres. I figur 1 er vist en vekslerplade med tydelige rødlige belægninger (fouling) på hele fladen, der vender mod vandsiden. På ammoniaksiden (gas) er der derimod ingen betydelige belægninger at se. Nederst i figur 1 er vist et makrobillede af den afskrabede belægning på veksleren (vandsiden), og højden af belægningen var 63 μm på den ene side og 28 μm på den modsatte side.

Belægningen bestod overvejende af jernoxider, som indikeret i figur 19 ud fra forekomsten af Fe. Elementaranalysen omfatter kun Fe-atomet, men jernoxider indeholder ilt, som også vil udgøre en stor del af massen i belægningen. Hvis det antages, at hovedparten af Fe var bundet i jernoxidet ferrihydrit, så udgør dette cirka 60 % af tørstofmængden i belægningen. Den resterende del kan tilskrives karbonater, metaloxider og biofilm. I biofilm kunne der bestemmes $2 - 6 \cdot 10^6$ celler/ cm^2 .



Figur 16: Plade fra varmeveksler 9007. Øverst: Rødlige belægninger på vandsiden af veksleren består hovedsageligt af jernoxider fra vandsystemet. Midten: Næsten ren vekslerplade på ammoniaksiden. Nederst: Nærbillede af afskrabet belægning på vandsiden.



Figur 17. Analyse af belægningen på 9007-vekslerpladen på de to vandsider angivet med hhv. rød og grøn. Tørstof-mængden er angivet med TSS, kulstofmængden er angivet med NVOC, og de fem grundstoffer, der er kvantificeret, er angivet efterfølgende.

Sidestrømsreaktoren var i drift med gennemstrømning og rotor i ca. 80 % af tiden frem til prøvetagning den 25. maj 2010. Kuponerne havde imidlertid ingen tydelige belægninger, der kunne sammenholdes med observationer fra 9007-varmeveksleren. Der blev derfor ikke foretaget analyser af kuponerne.

Effekten af rensning af 9006-veksleren med oxalsyre var synlig, idet der var en klar gulfarvning af udløbsvandet efter CIP-procedure. Tilsvarende observationer på belægninger fra 9007-veksleren blev også eftervist i laboratoriet (data ikke vist). I figur 20 er vist et billede af udløbsvandet fra CIP sammenlignet med kemikaliet før tilsætning i veksleren. Imidlertid viste energimålinger før og efter CIP af veksleren, at der ikke kunne opnås en betydelig effekt af varmeoverførslen. Således var den gennemsnitlige varmeoverførselskoefficient hhv. 7760 W/m²K (3008 målinger over 11 dage) og 7451 W/m²K (3724 målinger over 13 dage) før og efter CIP. Dermed kunne ikke opnås en forøgelse af varmeoverførslen.



Figur 18. Billedet viser dunke med oxalsyre hhv. før og efter CIP af 9006-veksleren.

Kølevandsanalyser

I Tabel 2 er vist en oversigt over mikrobiologiske monitoringsdata fra de to kølesystemer. Det totale antal bakterier var i monitoringsperioden i begge køleanlæg i størrelsesordenen 10^6 til 10^7 celler/ml. I 13/15 °C systemet var der dog 16. juni det laveste bakterieniveau på $1,2 \cdot 10^5$ celler/ml. Denne forskel indikerer, at der sker en tilvækst af bakterier i kølesystemet. Analyser med kvantitativ qPCR viste, at disse var i overensstemmelse med epifluorescens data, samt at langt hovedparten af mikroorganismene tilhører domænet *Eubakterier*. Desuden blev der detekteret lave forekomster af *Legionella* i 13/15 °C systemet og under detektionsgrænsen i 4/8 °C systemet.

Kølesystem/dato	Total bakterietal	<i>Eubakterier</i>	<i>Arkebakterier</i>	<i>Defferibacter</i>	<i>Legionella</i>
	(celler/ml)				
13/15 °C					
8. april	$1,1 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$	$5,9 \cdot 10^1$		
25. maj	$2,6 \cdot 10^6$			Ikke detekteret	$1,8 \cdot 10^3$
16. juni	$1,2 \cdot 10^5$				
5. juli	$1,2 \cdot 10^6$				
24. august	$1,3 \cdot 10^6$				$1,6 \cdot 10^2$
7. september	$3,7 \cdot 10^6$				$6,3 \cdot 10^1$
4/8 °C					
15. april	$5,1 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^1$		
25. maj	$1,1 \cdot 10^6$				Ikke detekteret
16. juni	$1,1 \cdot 10^6$				
5. juli	$2,7 \cdot 10^6$				
24. august	$2,0 \cdot 10^6$				$3,7 \cdot 10^1$
7. september	$4,1 \cdot 10^6$				Ikke detekteret

Tabel 2. Mikrobiologiske analyser af vand fra Færch Plast i 13/15 °C og 4/8 °C kølesystemerne. Prøverne blev, bortset fra "Total bakterietal", analyseret med qPCR.

5.3.4 Evaluering af vandbehandling og rengøring af vekslerplader

Biofouling

I kølesystemer udgør *Legionella* den væsentligste sundhedsmæssige risiko. Dette skyldes, at bakterien kan indåndes ved forstøvning af vand, som det bl.a. sker i åbne køletårne. Desuden kan der skabes vandaerosoler, når haner eller ventiler åbnes under højt tryk. *Legionella*-bakterien kan give alvorlig lungebetændelse, og i kølesystemer er det vigtigt at monitorere *Legionella*-forekomsten for at kunne kontrollere tilvæksten. Biofouling udgør et andet problem i kølesystemer, idet tilvækst af biofilm, dvs. biologiske belægninger, kan forårsage reduceret varmeoverførsel på vekslerplader og endda tilstopning. Hermed nedsættes driftsikkerheden og energieffektiviteten væsentligt.

I de to kølesystemer kunne detekteres *Legionella* i 13/15 °C kølesystemet, og forekomsten var relativ lav. Idet qPCR-metoden normalt detekterer et højere antal (sammenholdt med dyrkningsbaserede metoder), vurderes forekomsten at være lav. Dette er i overensstemmelse med, at vækst af *Legionella* sker i temperaturintervallet 20–45 °C, hvorved tilvækst sandsynligvis kun vil forekomme i perioder, hvor temperaturen i systemet øges af forskellige årsager som f.eks. ved driftstop.

Den generelle forekomst af bakterier viste op til 10^7 celler/ml, hvilket er ca. 100 gange højere end det niveau, der kan forventes i drikkevand. Det laveste niveau i 13/15 °C kølesystemet var på niveau med dette. Der sker derfor en tilvækst i systemet, og det er væsentligt, at tilvæksten kontrolleres med henblik på at nedbringe risikoen for biofouling generelt. Vækst af bakterier er betinget af tilgængeligheden af næringsstoffer. Disse tilføres systemet ved kontaminering fra produktionssystemet med f.eks. smøreolie, produktionskemikalier og snavs, men også vandbehandlingsmidler udgør en vækstfaktor. Dette skyldes, at de indeholder både aktivstoffer og hjælpestoffer, som med tiden nedbrydes og skaber vækst af bakterier. For at opnå kontrol med bakterievækst er det derfor vigtigt at holde næringsstofkoncentrationen lavest muligt. Dette kan gøres ved at begrænse brugen af unødige vandbehandlingsmidler samt ved at anvende filtreringsteknologier (se nedenfor).

5.3.5 Vandbehandling og CIP

Der tilføres to forskellige biocider skiftevis hver anden uge hhv. Nalco 77350 og Nalco 77352, der indeholder to forskellige aktivstoffer, hhv. glutaraldehyd og isothiazolin. I 13/15 °C doseres 5 liter Nalco 77350 hver fjerde uge og i 4/8 °C doseres hver anden uge skiftevis 6 liter Nalco 77350 eller Nalco 77352. Desuden tilsættes korrosionsinhibitor (Nalco Trac 100) og en stabilizer (Nalco 2513), som indeholder uorganiske forbindelser, som ikke forventes at øge væksten af mikroorganismer.

Jævnfør tabel 2 kan biocid-doseringen dog ikke eliminere mikrobiologisk vækst, hvilket kan skyldes, at kemikalierne med tiden nedbrydes og giver anledning til eftervækst. Desuden kan hjælpestoffer som magnesiumnitrat og metanol bidrage til mikrobiologisk eftervækst. Effekten af biocid-tilsætningen kan evalueres ved at udskifte kølevandet og monitere den mikrobiologiske tilvækst over en kort periode uden biociddosering.

Rengøring af veksleren (CIP) blev foretaget med en opløsning af oxalsyre, der er anvendeligt til at opløse jernoxider. Analysen af veksleroverfladen kunne her anvendes til at vælge en bedre CIP-procedure, idet foulingen fortrinsvis bestod af jernoxider. Den kraftige gulfarvning indikerede, at en del af jernoxiderne blev opløst af oxalsyre (Figur 3). Imidlertid kunne der ikke detekteres en forøgelse af varmeoverførslen, hvilket kan skyldes, at belægningen af jernoxider ikke sænker varmeoverførslen betydeligt. Dette var i overensstemmelse med tidligere observationer fra 9006-veksleren. I forhold til den oprindelige CIP-procedure, hvor CIP-væsken opvarmes til 50 °C, vil dette ikke forbedre effekten af CIP. Dette skyldes, at jernoxider omdannes til mere krystallinske forbindelser, som er vanskeligere at opløse.

Jævnlig rensning af veksleren vil dog minimere risikoen for tilstopning i veksleren. Det er muligt, at belægningen med jernoxider forårsager et øget energiforbrug til pumper pga. øget modstand i veksleren, men dette er ikke nærmere undersøgt her.

5.3.6 Anvendelse af filtre

I de to kølesystemer anvendes posefiltre med en porestørrelse på 5 μm . Analyserne fra vekslerpladen i 9007-varmeveksleren indikerer, at jernoxider udgør en væsentlig del af de partikler, der danner belægninger, og en bedre filtrering vil formentlig kunne modvirke dette. Jernoxiderne stammer sandsynligvis fra det vand, som anvendes til køleformål samt fra korrosion af jernrør i kølesystemet. Effektiv partikelfjernelse vil derfor kunne modvirke fouling i systemet. Partikelstørrelsesfordelingen er ikke kendt, men kølevandet er kraftigt rødfarvet, som vist i figur 21, hvilket indikerer en relativ høj partikelkoncentration. Der er tidligere foretaget grundstofanalyser af partikler, filtreret på 0,45 μm filter, der viste, at jern udgjorde 58 %. Da jern er bundet i jernoxider som f.eks. ferrihydrid, udgør disse en større procentuel fraktion. En mere effektiv partikelfjernelse vil kunne opnås med et filter med mindre porestørrelse end i de nuværende posefiltre, og nedenfor er foreslået en række filtre, der kan erstatte eller supplere den nuværende vandbehandling.



Figur 19. To vandprøver fra 13/15 °C kølesystemet.

Sandfiltre

Sandfiltre består grundlæggende af en lukket beholder med sand af variabel kornstørrelse, hvorigennem der ledes kølevand. I nogle sandfiltre er øverst et lag af hydroantrazit, som adsorberer opløst organisk stof. I filteret akkumulerer partikler og slam fra mikrobiologisk vækst. Sandfilteret har ingen præcis defineret porestørrelse og vil ofte være utilstrækkelig til at fjerne partikler mindre end 20 μm . Da sandfilteret også fungerer som biologisk filter, fjerner det opløste næringssalte fra kølevandet, hvorved mikrobiologisk vækst i kølesystemet kan minimeres. I sandfilteret akkumuleres der herved slam, som fjernes ved at returskylle sandfilteret med passende intervaller. Dette styres ofte automatisk ved hjælp af monitoring af trykdifferens i sandfilteret.

Sandfiltre er almindeligt anvendt i mange tekniske systemer med vand, men på grund af det store overfladeareal i filteret er det ikke kompatibelt med dosering af biocider. Sandfilteret bør som minimum dimensioneres efter at kunne udligne den mikrobiologiske vækst i kølevandet. Den mikrobiologiske vækstrate kan bestemmes ud fra bioanalyse, der udføres i laboratoriet og ved at monitere bakterieforekomsten i kølesystemet. Anvendelse af sandfiltre og et mikrobiologisk monitoringsprogram kan ofte reducere doseringen af biocid betydeligt. Sandfiltre leveres f.eks. af Silhorko, Nalco og DVS vandteknik.

Partikelfiltre

Partikelfiltrering favner en række forskellige teknologier. Dette skyldes dels den relative store spredning af partikelstørrelser fra centimeter til nanometer og dels graden af automatisering. Normalt er det porestørrelsen i det anvendte filter, der bestemmer, hvilke partikelstørrelser, der tilbageholdes af filteret. Det er derfor ofte brugbart at analysere partikelstørrelsesfordelingen af det medie, der skal filtreres med henblik på at vælge en porestørrelse af filteret.

Partikelstørrelsesfordelingen kan analyseres med laserdiffraktion (se <http://www.teknologisk.dk/specialister/28783>).

Der anvendes posefiltre med en porestørrelse på 5 µm i Færchs kølesystemer, men disse er utilstrækkelige til at fjerne rødfarvning af vandet samt at undgå belægningsdannelse på vekslerplader og forskellige værktøjer, der anvendes i produktionen. Der findes posefiltre ned til 1 µm porestørrelse, men jo mindre porestørrelse jo hurtigere tilstopper filteret. Alternativt kan der anvendes dybdefiltre eller si-filtre i metal, men her vil samme problematik være gældende med hyppig udskiftning af filteret.

Selvrensende filtre kan anvendes, når belastningen på filteret er højt, og der ofte er behov for at rense filteret. Sådanne filtre findes i forskellige udgaver, og et eksempel er Heco filtrations auto-inline filtre med en porestørrelse ned til 30 µm eller Boll-filter self clean med porestørrelse ned til 50 µm. Rensningsprincippet i Heco-filteret er en svaber, som skraber filteret fri for slam. Hyppigheden justeres ved at måle differenstrykket hen over filteret (se <http://www.heco-filtration.dk/side2626.html>). Boll-filteret renses ved tilbageskyllning af filteret (se <http://www.bollfilter.dk/daenisch/produkte/pdfs/6.18.pdf>).

Der findes også selvrensende filtre med mindre porestørrelse helt ned til 0,04 µm. Et eksempel er Cometas´ keramiske filtre (se <http://cometas.dk/products/ceramic-membranes/aqua-solution>). Filtrene kan anvendes i en række forskellige applikationer og vil potentielt kunne anvendes i kølesystemer. Porestørrelsen, der kan anvendes, afhænger af den gennemstrømning, filteret skal dimensioneres til, og for eksempel har et 0,04 µm filter en kapacitet på 6 m³/time. Filteret renses for partikler ved returskyllning. Teknologien er relativt ny og har været kommercielt tilgængelig i cirka fem år.

Et andet lignende filtersystem kommer fra EnwaMatic som kan filtrere partikler ned 5 µm. Systemet er designet til anvendelse i bl.a. kølesystemer og er installeret i forskellige tekniske systemer i bygninger (se www.enwa.no). Filteret har en selvrensende funktion.

For de selvrensende filtre beskrevet oven for vil det dog være vedligeholdelsesomkostningerne, der er kritiske mht. hvor ofte, der skal skiftes filtermateriale, og systemet skal efterses ved tilstopning og lignende. Desuden er det kun Cometast-filteret, der kan filtrere partikler mindre end 5 µm. Det foreslås at lave en test med posefiltre med en porestørrelse på 1 µm, for at se om dette kan reducere rødfarvningen af vandet. Fjernelse af bakterier fra kølevandet ved filtrering kræver en porestørrelse på højst 0,45 µm, og derfor vil de fleste partikelfiltre kun have en begrænset effekt på bakterieforekomsten i vandet.

5.3.7 Konklusion af vandbehandling ved Færch Plast

Analysen af vekslerpladen var værdifuld i forhold til at vælge CIP-procedure. Belægningen bestod hovedsageligt af jernoxider, der også bevirker rødfarvning af kølevandet. På baggrund heraf blev valgt oxalsyre som opløsningsmiddel til CIP-proceduren. Dette opløste jernoxider på vekslerpladen, men der kunne imidlertid ikke observeres en forøgelse af varmeoverførslen. Rensning af vekslerne vil dog stadig være relevant for at modvirke tilstopning i veksleren og nedbringe trykfaldet henover veksleren.

Den generelle forekomst af bakterier viste op til 10^7 celler/ml. Dette var 100 gange højere end det laveste niveau, og sammenlignet med drikkevand viste dette, at der forekommer bakterievækst i kølesystemerne. Forekomsten af *Legionella*, som normalt udgør den største risiko i køleanlæg, var derimod lav. Dette var i overensstemmelse med den lave temperatur i køleanlæggene (<20 °C).

Den relative hyppige dosering med biocider kunne ikke modvirke tilvækst af bakterier. Effekten af biociddosering kan evalueres ved at udskifte kølevandet og monitere tilvæksten af bakterier, inklusiv *Legionella*, i vandet over en periode hhv. uden og med biociddosering.

Til forbedring af vandkvaliteten foreslås anvendelse af partikelfilter og/eller sandfilter. Partikelfiltreringen skal imidlertid fjerne partikler mindre end 5 µm, som er partikelstørrelsen på de posefiltre, der anvendes i dag. Det foreslås at udføre en test med 1 µm posefiltre, for at se om dette kan reducere rødfarvningen af kølevandet. Som alternativ til biocidbehandling kan desuden anvendes et sandfilter, der fjerner partikler, som reducerer risikoen for bakterievækst i kølesystemet.

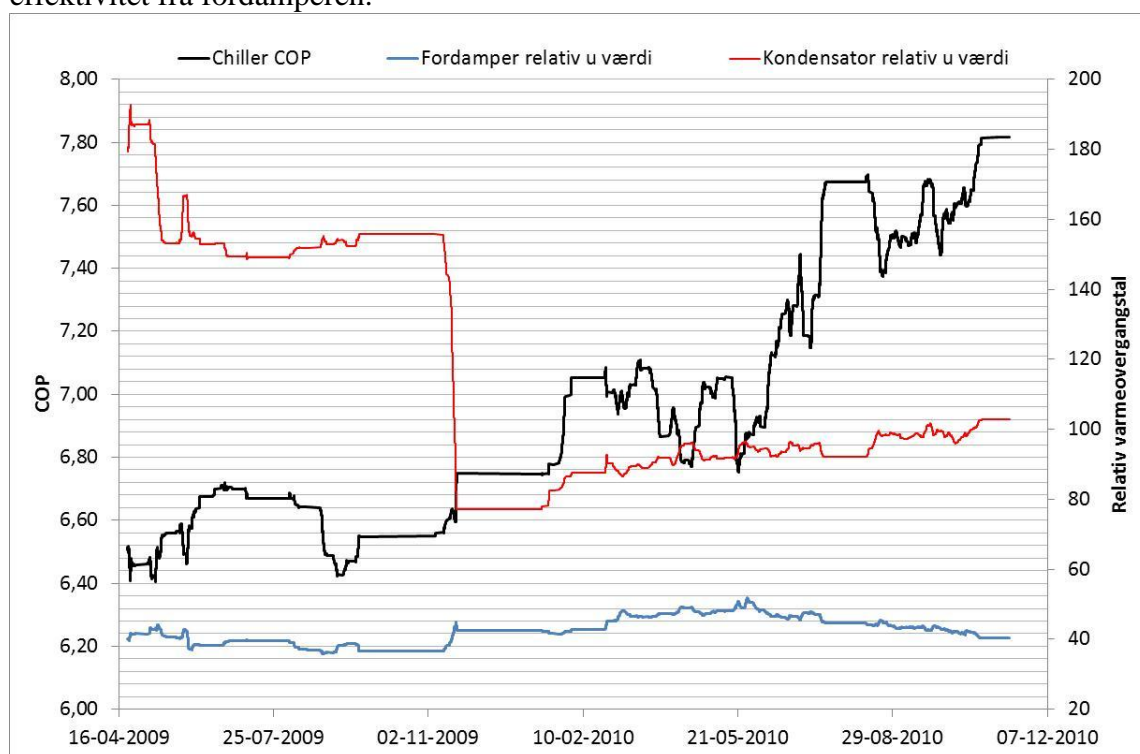
5.4 Konklusion på foulinganalyser ved Færch Plast

Da projektet startede med at registrere data ved Færch Plast, var det oplagt at bruge det eksisterende Styrings-, Regulerings- og Overvågningssystem, (SRO-system) til dataopsamling. Færch Plast har arbejdet intensivt med dette system, og havde et godt overblik over energistrømmen og effektiviteten af de enkelte anlæg. Det at fabrikken har haft gode data til rådighed, har betydet, at driftskonditionerne er blevet optimeret, da det tydeligt har kunnet aflæses på energieffektiviteten. Et godt eksempel på dette er kølevandkredstemperaturen, som er øget fra det oprindelige design på 4 °C til nu næsten 8 °C, hvilket giver en effektivitetsforbedring på køleanlægget på 17,7 %.

For at kunne bruge dataene fra SRO-systemet, var det dog nødvendigt at ændre på nogle parametre for at kunne bruge data til energibalanceregningen. Udover disse mindre justeringer har vi følgende forslag til optimering af det eksisterende system, herunder:

- Installerer flowmåler på kondensatorens vandside således, at effekten, der afsættes i kondensatoren, kan beregnes ud fra flow og vandtemperaturer.
- Ved udførelse af referencemåling skal både kondensator og fordamper CIP-rengøres.
- Der kunne med fordel monteres et 1 µm posefilter til fjernelse af jernpartikler.
- Etablering af et sandfilter som alternativ til biocidbehandling.

For at få det samlede overblik over køleanlæggets samlede effektivitet er værdien for COP vist i nedenstående diagram. Når COP sammenholdes med de relative varmeovergangstal for henholdsvis fordamper og kondensator ses, at COP er steget på trods af, at kondensatorens effektivitet er faldet. Som tidligere nævnt, kommer den største effekt på anlæggets samlede effektivitet fra fordamperen.



Figur 20: Ovenstående graf viser den resulterende COP for køleanlægget sammenlignet med de relative varmeovergangstal.

Det er ikke muligt alene på baggrund af ovenstående graf at udlede sammenhængen mellem anlæggets stigende effektivitet og kurverne for henholdsvis fordamper- og kondensatoreffektivitet. Det fremgår ikke af de relative varmeovergangstal, hvad årsagen er til, at effektiviteten forringes, såsom om det skyldes fouling på vandsiden, øgede vandtemperaturer i systemet eller andre forhold. Den relative U-værdi kan bruges som indikatorer for anlæggets tilstand, og når der konstateredes en afvigelse, som er større end den acceptable værdi, skal datene analyseres. For at finde den bagvedliggende årsag til en faldende effektivitet er det nødvendigt at analysere de værdier, som udtrykker den enkelte varmeveksleres effektivitet.

Køleanlægget ved Færch Plast er et godt eksempel på, hvor meget det kan betyde at optimere processen. Olieretur systemrenovering og forbedret vandbehandling har betydet, at COP er øget med 21,8%, hvilket giver en årlig besparelse på 59.600 kr./år ved en elpris på 70 øre og 5000 fuldlastdriftstimer pr. år.

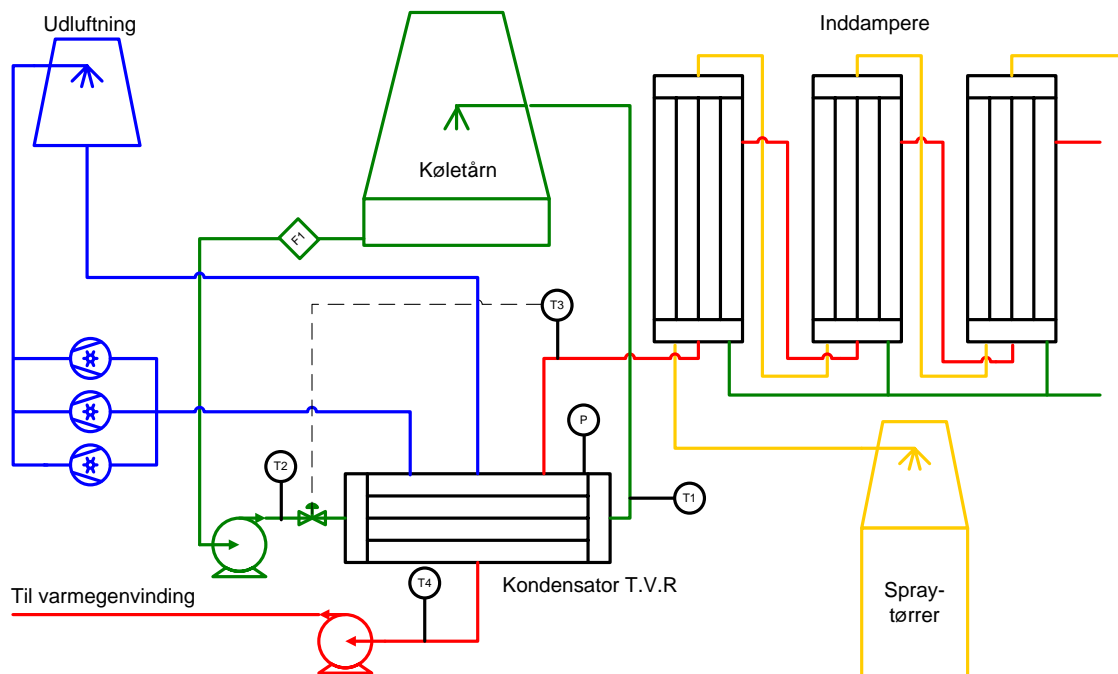
Dette er kun den beregnede besparelse på det ene anlæg, som i forvejen var godt optimeret. Færch Plast har yderligere 4 køleanlæg. De indirekte besparelser, som f.eks. forbedret procestid, er ikke medtaget i denne økonomiske beregning.

6 Arla Foods

6.1 Veksler 4: Dampkondensator

Varmeveksleren, som blev valgt, er en dampkondensator på mælkepulverfabrikken i Videbæk. Fabrikken bruger store mængder energi herunder naturgas til at inddampe mælken før tørring til pulver.

På fabrikken og i koncernen generelt er der et meget stort fokus på energibesparelser, og investeringer der kan medføre at energiforbruget per kilo produceret produkt nedsættes, har en høj prioritet ved valg af projekter. Der har ikke tidligere på fabrikken været tradition for at lave energi overvågning af processerne og det meste måleudstyr skulle indkøbes og monteres specifikt til at dække dette behov. Da selve dampkondensatoren er placeret i et sanitært område, som er klassificeret i henhold til gældende lovgivning for produktion af fødevarer, har det været en tidskrævende proces at få måleudstyret monteret og tilpasset opgaven.



Figur 21: System for veksler 4 Kondensator T.V.R. Den røde kreds er kondensat, den grønne er køletårsvandet, hvor energimålingen laves, og den blå kreds viser vakuum-kredsen.

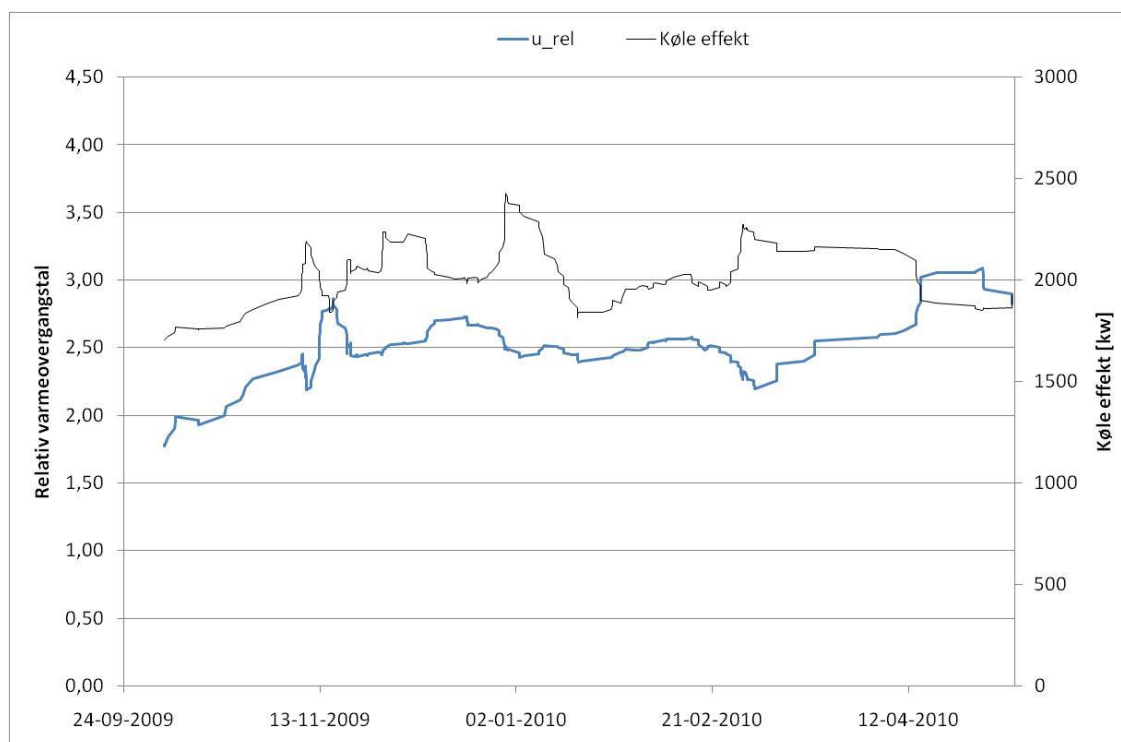
Kondensatoren er en rørveksler, som anvendes til at kondensere vanddamp i forbindelse med et mælkeinddampningsanlæg. Kølevandet i kondensatoren køles i et åbent køletårn. Veksleren CIP-rengøres normalt ca. hver 6. uge, idet vandet indeholder mælkerester, der bl.a. afsættes på kondensatoren. Vekslerens kapacitet er ca. 4 MW og temperaturniveauet er omkring 20-40° C. Energi balancen laves på køletårns vand siden ved at måle de to vandtemperaturer samt ved installation af en magnetisk flowmåler på køletårnsvandsiden.

For at opnå de ønskede driftsbetingelser for inddampningssystemet holdes trykket på kondensatsiden på 0,25 bar. Når veksleren er rengjort er det tilstrækkeligt at bruge to af de tre vakuumpumper for at opretholde det nødvendige tryk, men hurtigt efter en rengøring er det nødvendigt at tilslutte den 3. pumpe pga. fouling. Når det på et tidspunkt ikke længere er muligt at holde det ønskede lave tryk stoppes processen for at veksleren kan blive rengjort.

Energimålingen i systemet foretages på køletårssiden. Det er derfor ikke nødvendigt at medtage den dampenergi, der fjernes ved hjælp af vakuumpumperne ud fra den betragtning, at den damp, som vakuumpumperne fjerner, ikke skal kondenseres. Det er et stort ønske fra Arla, at kunne rengøre veksleren på det mest optimale tidspunkt, da omkostningerne forbundet med driftstop under rengøring er store, og samtidig er energiomkostningerne betydelige, når en foulet veksler er i drift.

6.2 Resultater fra Arla

Mælkepulverfabrikken, hvor kondenseringsvarmeveksleren er installeret, har opereret med en meget høj kapacitet igennem hele projektperioden. Det har derfor ikke været muligt at gennemføre vandanalyser, når veksleren er blevet rensat. Resultaterne er derfor et udtryk for, at det kun har været muligt at diskutere de teoretiske praktiske muligheder for vandbehandling og optimering i systemet. Det er denne gennemgang, der har ført til de forbedringer, som fremgår af nedenstående graf.



Figur 22: Effekt og relativ varmeovergangstal i vanddampkondenseringsveksler.

Resultaterne viser, at det relative varmeovergangstal er steget i løbet af projektet grundet øget fokus på rengøring af veksleren og en forbedret vandbehandling på køletårssiden.

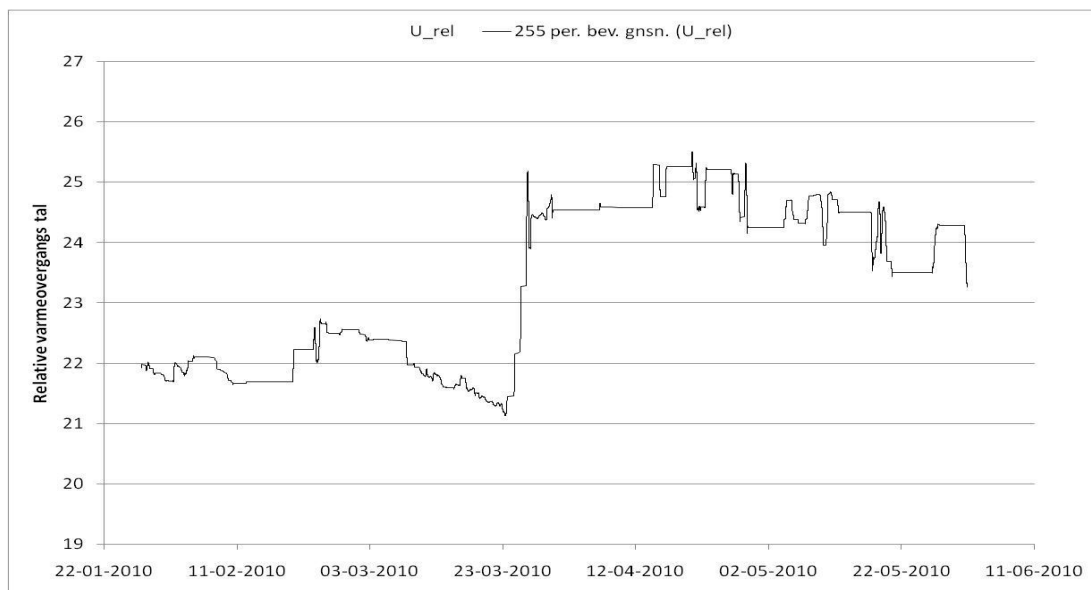
I denne type varmeveksler er det ikke hensigtsmæssigt at bruge udtrykket for det relative varmeovergangstal til at beregne meromkostningerne ved en foulet varmeveksler. Det skyldes, at den største indflydelse på effektiviteten på den kondenserende side er vakuumpumperne, og disse medtages ikke i beregningsudtrykket for den relative U-værdi. Det anbefales derfor, at Arla etablerer et permanent overvågningssystem (SRO), der bruges til at lave en total energibalace på kondensatoren og medtage vakuumpumpernes effektforbrug. Ved denne metode vil det være vakuumpumpernes effektforbrug, der indikerer, hvornår der er økonomi i at rense veksleren.

7 Veksler 5: Vand/vand-veksler ved Teknologisk Institut

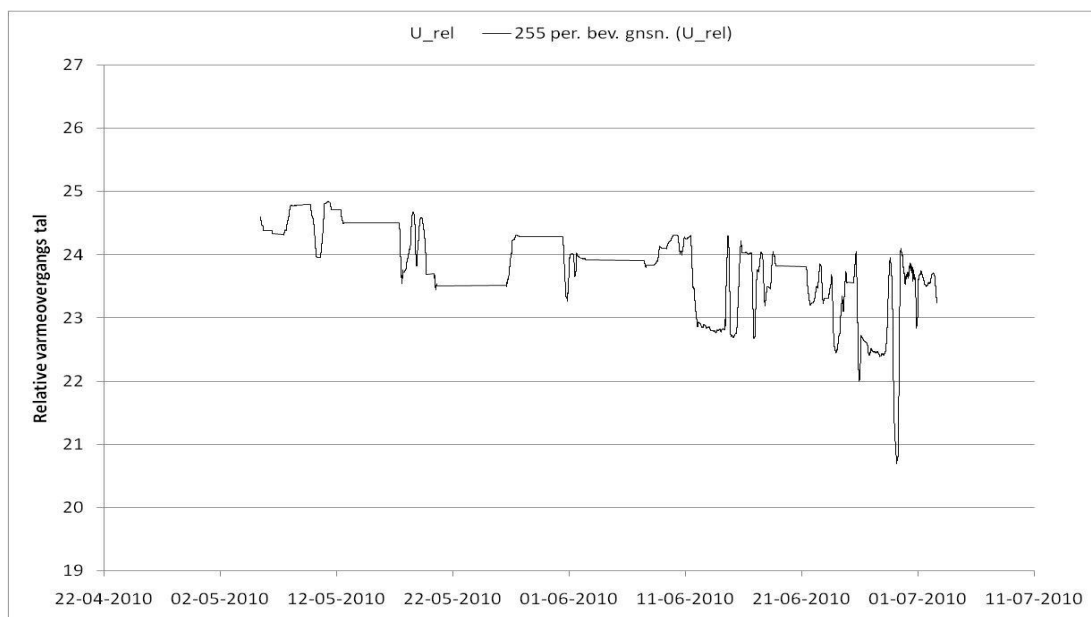
På Teknologisk Institut blev der udvalgt en vand/vand veksler således at der kunne gennemføre forsøg med energimålinger samt af få afprøvet prototypen af det nyudviklede overvågningssystem.

Veksleren er en pladeveksler fra APV, der køles med køletårsvand. Spædevandet til denne proces er blødgjort brugsvand fra forsyningsnettet. Kølekredsen er i drift konstant og bliver rengjort efter behov, dvs. når den ønskede kapacitet i systemet ikke længere kan realiseres. På den lukkede side af veksleren doseres biocid og korrosionsinhibitorer efter behov. Vandet på køletårnsiden behandles ikke, men er blødgjort vand.

7.1 Resultater fra TI veksler



Figur 23: Relativ varmeovergangstal på varmeveksleren ved TI for periode 1.



Figur 24: Data for periode 2 med et overlap af kurven fra perioden 5/5 til 5/6.

Figur 24 viser en kort periode for varmeveksleren ved Teknologisk Institut. I denne periode skete der en tilstopning af varmeveksleren, som gav sig udslag i, at systemet blev stoppet den 12/6, og varmeveksleren blev CIP-rengjort med sæbevand. Ved idriftsættelsen var der en fejl på blødgøringsanlægget på der betød at anlægget blev tilsat ubehandlet vandhanevand. Dette førte til at anlægget stoppede til mindre end 3 uger efter første rensning. I det efterfølgende afsnit er proceduren og rengøring efter dette driftstop beskrevet.

7.2 Vandbehandling og rensning af veksler på Teknologisk Institut

Varmeveksleren i kølesystemet i Køle- og Varmepumpeteknik blev adskilt 25. juni 2010. Fra stakken af vekslerplader blev den anden vekslerplade udtaget til analyse af belægningen. Fra hhv. siden med gummipakning (G) og siden modsat gummipakningen (MG) blev der aseptisk afskrabet et areal på 13×6 cm til analyse for tørstof, organisk stof og grundstofsammensætning. Desuden blev der foretaget mikrobiologiske analyser med epi-fluorescens mikroskopi og kvantitativ PCR (polymerase chain reaction). Belægningshøjden blev analyseret med digital billedbehandling.

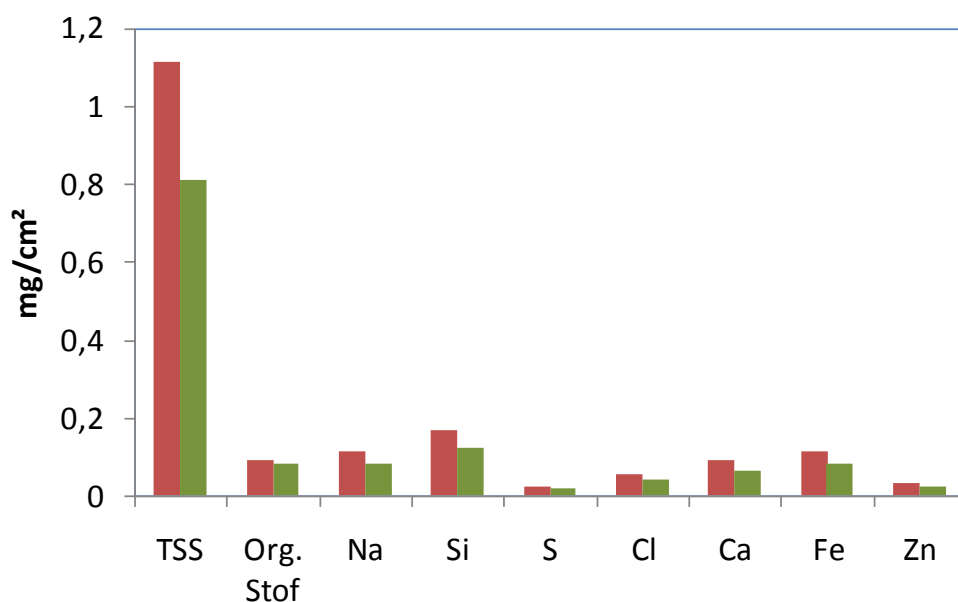
Resultater

Udtagning af en vekslerplade giver det bedste billede af de aflejringer, som opbygges på overfladen i driftsperioden. Hermed kan belægningstykkelsen bestemmes, og sammensætningen af belægningen analyseres. I figur 25 er vist billeder, taget umiddelbart efter, at veksleren blev adskilt. Både grovfilteret og vekslerpladerne var belagt med en del slam, som var relativt løstsiddende. Nederst i figur 27 er vist et makrobillede af belægningen på vekslerpladen (vandsiden), og gennemsnitshøjden af belægningen var $2520 \mu\text{m}$ på den ene side med gummipakning (G) og $1310 \mu\text{m}$ på den modsatte side (MG).

Belægningen var primært løstsiddende slam, som relativt nemt kunne skrubes fri fra pladen. Den bestod hovedsageligt af organisk materiale, sand (indikeret med Si), salt (indikeret med NaCl), og kalk (indikeret med Ca) og jernoxider (indikeret med Fe), som vist i figur 2. De mikrobiologiske analyser af slam/biofilm er vist i tabel 1 og viste relativt høje bakterieforkomster på $3 \cdot 10^8$ celler/cm². Heraf udgjorde *Legionella* 1-2 % af populationen. Tørstofmængden udgjorde 12 %, og den resterende del var vand bundet i matricen af biofilm og organiske og uorganiske komponenter i belægningen.



Figur 25. Varmeveksler fra Køle- og Varmepumpeteknik. Øverst: Grovfilter med en del tilbageholdt materiale. Midten: Umiddelbart efter at veksleren er adskilt. Nederst: Nærbillede af belægning på vandsiden af vekslerpladen.



Figur 26. Analyse af vekslerpladen på de to sider angivet med hhv. rød (MG) og grøn (G). Tørstofmængden er angivet med TSS, mængden af organisk slam med "org. stof", og de syv grundstoffer, der blev kvantificeret, er angivet efterfølgende.

Vekslerpladeside	Total bakterietal	<i>Eubakterier</i>	<i>Legionella</i>
	(celler/cm ²)		
Side med gummipakning (G)	$2,9 \cdot 10^8$	$5,4 \cdot 10^7$	$8,9 \cdot 10^5$
Side modsat gummipakning (MG)	$2,7 \cdot 10^8$	$6,8 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^6$

Tabel 3: Mikrobiologiske analyser af belægning på varmevekslerplade.

7.3 Forslag til CIP-procedure på TI-veksler

Analysen af vekslerpladen viste, at belægningen (foulingen) bestod af relativt løstsiddende biofilm. Biofilm binder ofte en del uorganiske komponenter som kalk og jernoxider, og derfor vurderes det, at en detergent vil kunne opløse og fjerne en del af den slam (biofilm), som var akkumuleret på overfladen. Nedenfor er foreslået en CIP-procedure modificeret efter den, der tidligere er anvendt på Færch Plast i projektet:

1. Anlægget tømmes for kølevand.
2. Skyl anlægget grundigt igennem med blødgjort vand, indtil der ikke længere er synligt slam.
3. Hvis muligt, opvarmes anlægget til 50 °C. Tilsæt 5 % Drewclean B 716 og lad anlægget køre 1 time. Gennemstrømningen vendes af og til.
4. Skyl anlægget grundigt igennem med blødgjort vand indtil der ikke længere er synligt slam. Gentag eventuelt punkt 1–3.
5. Drewclean B 543 tilsættes indtil pH-værdien er 2. Hvis pH stiger tilsættes yderligere. Lad anlægget køre i 2 timer og gennemstrømningen vendes af og til.
6. Neutraliser spildevandet til neutral pH med NaOH.

7. Anlægget skylles med blødgjort vand, indtil udløbsvandet er helt rent.

Der kan vælges andre kemikalier, som kan være lige egnet til formålet, men anvendelse af en detergent er her det vigtigste. Sørg også for at overholde sikkerhedskrav for anvendelse af kemikalier og krav om bortskaffelse.

Da forekomsten af *Legionella* i slammet var relativt høj, anbefales det at anvende maske under rengøringsarbejdet. Dette gælder især, hvor der er risiko for aerosol-dannelse.

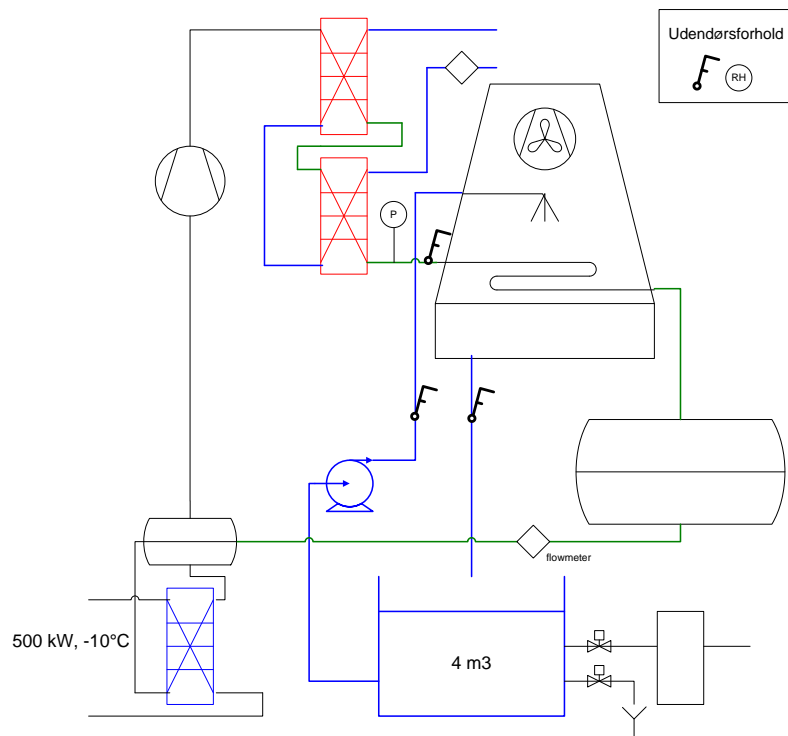
8 Veksler 6: Fordampningskondensator ved Skare Meat Packers

Kølevandet til slagteriprocessen produceres af flere ammoniakkompressorer og kondenseringsenergien afsættes i en fælles fordampningskondensator. Fordampningskondensatoren har en samlet kondenseringsydelse på ca. 1,7 MW. Veksleren er leveret af Baltimore, og den blev tidligere ikke overvågnet eller vedligeholdt regelmæssigt. Dette medførte en større renovation efter ca. 5 års drift, idet veksleren var meget beskidt og gav driftsmæssige problemer. Vandet, der spædes til køletårnet, er almindeligt brugsvand, som blødgøres før påfyldning. Efter de omtalte driftsmæssige problemer doseres biocid ca. hver fjortende dag, og veksleren inspiceres visuelt.



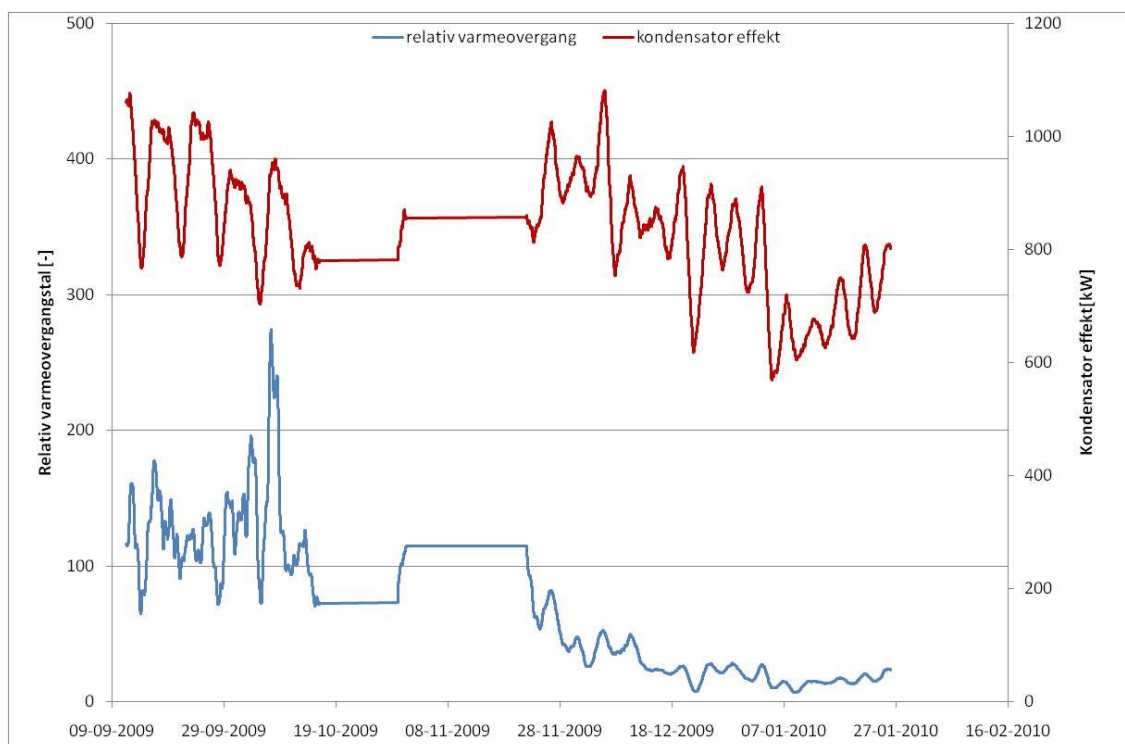
Figur 27. Fordampningskondensator ved Skare Meat Packers i Vejen.

Der var ved projektets start ikke etableret energimålere på denne veksler, så alle de nødvendige måledata skulle monteres. På ammoniakhøjtrykssiden er der to varmegenindvindingsvekslere. Disse kondenserer ikke gassen, men fjerner kun overhedningsvarmen, og derfor er disse vekslere ikke medtaget i energibalanceberegningerne. Den afsatte effekt måles på ammoniakside, og ammoniakflowet måles på ammoniakvæskesiden. Det var desværre ikke muligt at lave en flowmåling på rørene inden ammoniakreceiveren, da der ikke var en tilstrækkelig længde vandret rør, hvorpå ultralydsflowmåleren kunne monteres. Måleudstyret er derfor placeret på udløbet af receiveren, som betyder, at der er et udsving i målingerne, da dette flow påvirkes af en modulerende ekspansionsventil. For at sikre gode flowmålinger har det været nødvendigt at sænke periodetiden for målingen til 1 minut og derefter beregne gennemsnitlige værdier i en 10 minutters periode, som for de øvrige data. Da anlægget ikke regulerer kapaciteten hurtigt, er denne metode en rimelig præcis metode. En mere optimal metode hvorpå energimålinger kan foretages på en fordampningskondensator, er ved at montere en Ultralyd, Coriolis eller en Vortex-flowmåler på væskerøret ud af kondensatoren. For korrekt flowmåling skal den monteres på et vandret stykke rør i tilstrækkelig længde, og der laves en væskelås i indløbet til receiveren, således at røret under alle driftsforhold er fyldt med væske.



Figur 28: Kølesystem med overhedningsfjerner og fordampningskondensator ved Skare.

8.1 Resultater fra fordampningskøletårn ved Skare



Figur 29: Resultater på kondensatoreffekt og relativ varmeovergangstal.

Ovenstående resultater fra køletårnet viser, at den relative varmeovergang varierer i takt med den afsatte effekt. Det har i projektets tidsperiode ikke været muligt at foretage en rengøring af fordampningskondensatoren, og derfor er det kun ud fra teoretiske betragtninger, at effekten af fouling er beskrevet.

8.2 Vandanalyser

For at analysere mængden og typen af fouling på kondensatorrørene blev 5 kupper opsat på ydersiden af rørene. Kupperne var monteret i 145 dage, hvorefter de blev taget ned for analyse. På billedet nedenfor ses en af kupperne, og det er tydeligt, at fouling har fundet sted. En del skidt satte sig dog på indersiden af kupperen, da tilslutningen mellem rør og kupon ikke var helt optimal.

Analysen af det materiale, som er opsamlet på kupperen, viser, at der er tale om biologisk materiale, som på sigt vil føre til en nedsat effekt i kondensatoren. For at forhindre dette anbefales det, at der monteres et sandfilter i udløbet af vandkredsen for at fjerne slammet.



Figur 30: Billede af to af kupperne, der var monteret på rørene i fordampningskondensatoren.

8.3 Konklusion på Skare målinger

Konklusion fra køletårnet viser, at der sker fouling i køletårnet på trods af tilsætning af biocid. For at sikre at driftskonditionerne er acceptable, kan det anbefales at lave en energiovervågning på kølemiddelsiden og samtidig overvåge kondenseringstrykket. Såfremt der monteres et kombineret partikelfilter og sandfilter på vandsiden, vil det nedsætte risikoen for, at foulingen bliver så høj, at driften bliver forstyrret. Sideløbende med filtrering skal der tilsættes biocid for at forhindre, at legionellakoncentrationen bliver for høj. Biocid må kun tilsættes periodevis, og når det sker, skal vandflowet ledes uden om sandfilteret, så de slamomsættende mikroorganismer, der findes i filteret, ikke fjernes af biociden.

9 Veksler 7: Kondensator ved Novo

Kondensatoren er en pladevarmeveksler fra Alfa Laval, 780 KW ved 2/40° C, der køles med køletårsvand. Spædevandet til køletårnet er overfladevand fra en nærliggende sø. Køletårsvandet renses i et sandfilter og tilsættes biocid. På trods af dette er det en fast procedure, at kondensatoren CIP-rengøres hver 6. måned. Hvis ikke denne rengøring foretages, stiger kondenseringstrykket erfaringsmæssigt for meget, og der er risiko for driftsstop. Novo har et ønske om at få et bedre vedligeholdelsesinterval og en mere effektiv rengøringsprocedure og derved et mindre brug af vandbehandlingskemikalier og et lavere energiforbrug.

9.1 Vandbehandlingsaktiviteter på Novo Nordisk

I starten af projektperioden gennemførte Novo et intensivt arbejde i samarbejde med Teknologisk Institut for at forbedre vandkvaliteten i køleanlæggene. Analyser lavet forskellige steder i systemerne har vist, at det er lykkedes at få kontrolleret væksten af biofilm, og fouling i kølesystemerne er derfor minimeret.

På Novo Nordisk A/S var der installeret biofilm-reaktorer tilkoblet en sidestrøm på en række køleanlæg. I reaktorerne blev der monteret kuponer i rustfrit stål, hvorpå der efter en periode kunne analyseres for tilvækst af biofilm. I et af køleanlæggene var der udvalgt en veksler til monitoring af varmetransmission, og herfra var der monteret en biofilmreaktor opstrøms. Efter 164 dages eksponering var der imidlertid kun opbygget en meget tynd biofilm med 4×10^5 celler cm^{-2} , og der var ingen betydelig belægningsdannelse på kuponerne. Det blev vurderet, at dette ikke var tilstrækkeligt til at repræsentere den fouling, som kunne være til stede på vekslerpladerne. Imidlertid kunne dette ikke verificeres, da adskillelse af veksleren og udtagning af en vekslerplade ikke var mulig.

9.2 Konklusion på Novo analyse

Køleanlægget, som blev valgt til dette projekt, var udstyret med et system til COP- overvågning integreret i køleanlæggets Unisab styrings- og overvågningsenhed. Effekten i kølesystemet blev beregnet ud fra en eksisterende flowmåling af trykgassen i afgangsrøret på ammoniakkompressoren. Endvidere blev sugetrykket, kondenseringstrykket samt afgangstemperaturen på gassen målt, således at enthalpierne og densiteter på ammoniakken kunne bestemmes. Med disse målinger skulle kondensatoreffekten på anlægget i princippet kunne bestemmes.

Flowmåleren på anlægget var ved starten af datalogningsperioden defekt, og efter en periode, hvor forskellige forhold blev verificeret, blev flowmåleren skiftet til en ny Vortex-flowmåler. Efter en driftsperiode på et halvt år blev det konstateret, at det ikke var muligt at få valide data fra denne flowmåling. Forsøg på Teknologisk Instituts køleanlæg har vist, at denne type flowmåler påvirkes af vibrationer i trykrøret, som kommer fra kompressoren og pulsationer i flowet, som ligeledes stammer fra kompressorens stempelbevægelser.

Energimåling på baggrund af en Vortex flowmåler i trykgasrøret kan derfor ikke anbefales. Det kan i stedet anbefales, at der altid monteres en flowmåler på vandsiden i kølekredsen. Dette er den billigste og mest nøjagtige måde at lave energibalancen på. Det har på grund af pladsproblemer i køleinstallationen ikke været muligt at få lavet en flowmåling på kondensator vandkredsen ved Novo. Der er på baggrund af dette ingen valide data fra Novo-installationen.

10 Udvikling af et system til at overvåge fouling

Som resultaterne i projektet viser, er det ikke tilstrækkeligt at have en god energimåling for at kunne vurdere årsagen til foulingen. Som det ses af analysen ved Færch Plast, er det ikke tilstrækkeligt at se på køleanlæggets samlede COP-værdi for at finde årsagerne til foulingen. I hvert enkelt tilfælde er det nødvendigt at se på de bagvedliggende data for at finde årsagen. Der er dog ingen tvivl om, at et godt SRO-system, som det er anvendt ved Færch Plast, har en stor betydning for, at anlægget opererer ved høj effektivitet.

Alfa Laval tilbyder et servicekoncept, hvor serviceteknikere kommer med et komplet måleudstyr, der påmonteres anlægget. Måledataene bliver beregnet direkte i Alfa Lavals eget beregningsprogram, der kan regne på den eksakte veksler. Derved sammenholdes den aktuelle performance med den beregnede, der ligger til grund for dimensioneringen. Fordelen ved denne metode er, at der kommer et direkte tal for, hvor foulet veksleren er, og dette tal kan holdes op imod den ideelle situation. Ulempen ved denne metode er, at den er omkostningskrævende og kræver en specifik indsats fra den virksomhed, som ønsker en given veksler undersøgt. Medmindre en given virksomhed har nogle faste vedligeholdelsesrutiner, vil denne indkaldelse sandsynligvis først ske, når der ikke længere er tilstrækkelig kapacitet i køleanlægget, og fouling kan derfor nemt have betydet ekstra omkostninger, længe inden det detekteres.

Grundfos har i projektet udviklet et overvågningsværktøj ”Grundfos Remote Management”, som kan kobles op med eksisterende eller tilkøbt måleudstyr og lave en dataopsamling for de enkelte systemer. Dette system er billigere end at lave et egentligt SRO-system. Ulempen ved systemet er dog at data manuelt skal downloades til Excel, hvorefter der kan foretages en databehandling. Projektet har vist at der skal datalogges for hvert minut for at få et validt resultat, og det medfører en stor mængde data. For at der ikke skal overføres for store mængder, er det nødvendigt, at der udføres en datasortering sideløbende med logningen. Det har ikke været muligt at implementere en datasortering og beregningsdel i Grundfos-systemet i løbet af projektet. Grundfos vil på baggrund af dette projekt overveje mulighederne for at lave et system, der kan udnytte projektets resultater til at forsætte udviklingen af et specifikt produkt til overvågning af fouling.

10.1 Teknologisk Institut udvikler et værktøj, der kan analysere fouling

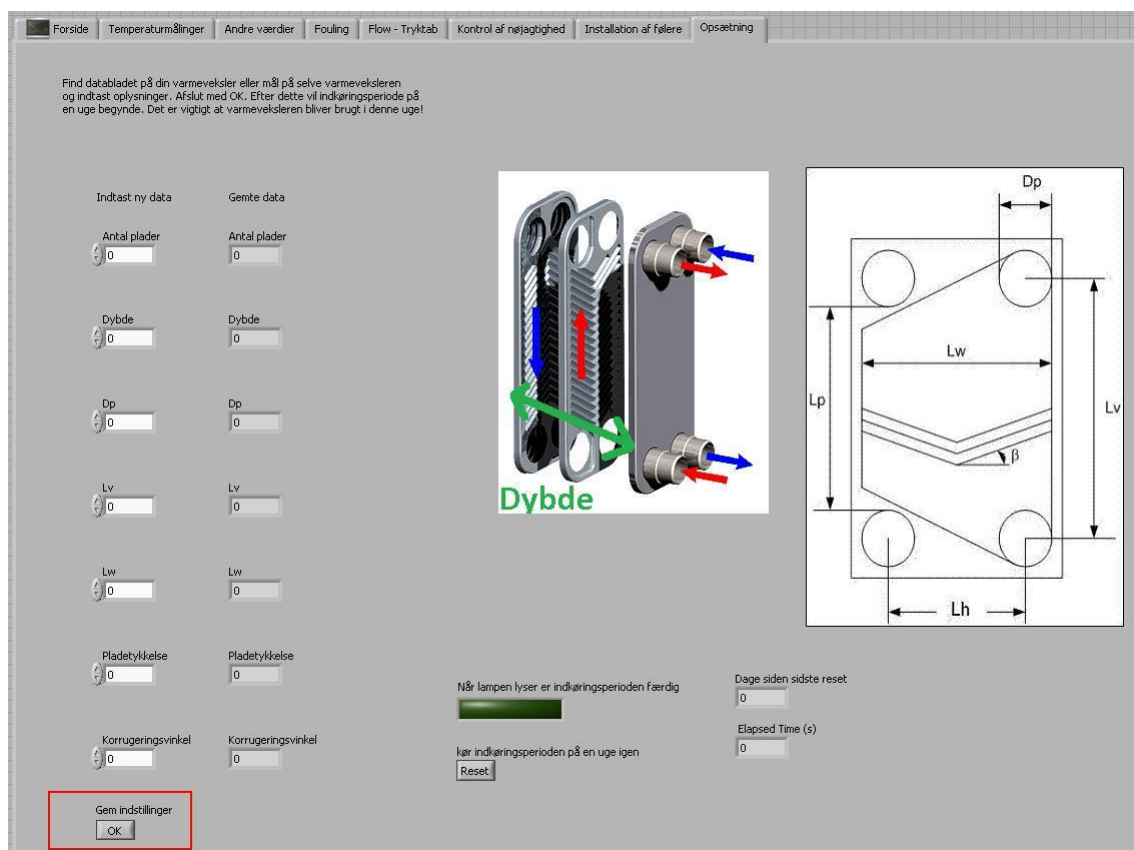
Da det i projektet blev klart, at der var behov for at lave et grundigt sorterings- og analysearbejde sideløbende med datalogningsprocessen, iværksatte Teknologisk Institut et udviklingsarbejde for at udvikle et sådan system. Systemet er baseret på et eksisterende datalogningssystem, TI-DAQ, baseret på Labview, hvor der kan laves online-beregninger.

Programmet er bygget op omkring standard varmevekslerkorrelationer og teorier, og derfor kræves det, at designparametrene for den gældende pladevarmeveksler kendes og kan testes ind i programmet. Programmet er udviklet adaptivt, så det hele tiden forbedrer nøjagtigheden i beregningen af foulingens virkning på effektiviteten. Den nuværende model er bygget op omkring vand til vand pladevarmevekslere, men programmet kan let udvides med andre gængse varmevekslermodeller, som dækker de fleste af de typisk anvendte varmevekslertyper.

Foulingprogrammet er udviklet på den måde, at man filtrerer de rå måledata ud fra nogle justerbare steady state kriterier, således at det sikres, at der kun analyseres på egnede måleværdier.

Efter filteret bliver dataene sendt igennem et stabilitetstjek. Stabilitetstjekket bruges til at finde data, hvor temperaturen i varmeveksleren ikke har ændret sig i 5 minutter (5 minutter er den tid det tager for TI's varmeveksler at blive stabil efter en temperaturændring). Grunden til dette tjek er, at den senere omtalte beregningsmodel er lavet til et steady state scenarium. I programmet er der en justeringsmulighed med navnet "Afvigelse", der kan justeres for at bestemme tolerancen på, hvornår målingen anses for stabil. Hvis denne værdi sættes for lavt, vil alt data blive smidt væk, hvis den sættes for højt, vil ustabil data blive anset for stabilt data. Efterfølgende er dataene klassificeret som brugbare.

Når dataene er stemplet som brugbare, bliver de sendt videre til et varmevekslerberegningsmodul, opbygget i EES (Engineering Equation Solver). EES-programmet er bygget op, som en "steady state" model af den aktuelle varmeveksler. EES-programmet modtager de to indgangstemperaturer og de to flow. Ud fra dette beregner den, hvad udgangstemperaturene ville være i en ren varmeveksler og sammenligner det med de aktuelle udgangstemperaturer. Derved fås en delta-temperatur, som skyldes fouling. Denne delta-temperatur er afhængig af graden af fouling og udnyttelsesgraden af varmeveksleren.



Figur 31: Indtastning af designdata i varmeveksleranalyseprogrammet.

I programmets resultatbillede bliver foulingomkostningerne synliggjort. Da foulingomkostningen afhænger af anlægsopsætningen, bliver brugeren bedt om at definere, hvilken type anlæg, der er koblet til varmeveksleren. Hvis et køleanlæg er koblet på varmeveksleren, skal brugeren indtaste en gennemsnitlig COP, og programmet vil fortælle, hvor meget ekstra effekt kompressoren optager på grund af foulingen. Dette bliver lagt sammen og fremvises ved: ”kr. tabt det sidste døgn” og ”kr. tabt siden sidste rensning”.

Programmet er ved projektets slutning stadig i indkøringsperioden på varmeveksleren på Teknologisk Institut, og det er planlagt, at der skal arbejdes videre med modulet i et ingeniøraftgangsprojekt. Det er målsætningen, at få systemet afprøvet i et kommende afgangsprøje ved en af de involverede virksomheder.

11 Konklusion på foulingprojektet

11.1 Konklusion på overvågningskonceptet

Projektet har vist, at det er muligt at udvikle det ønskede produkt, baseret på projektets grundlæggende idé, men også at det stiller væsentlige krav til kvaliteten af de målte data. Ligeledes skal der gennemføres en løbende og automatisk kvalificering af dataene, før disse anvendes til analyserne for ikke at oversvømme systemet med data og for at opnå valide beregningsresultater. Det er dog ikke lykkedes at få et af de medvirkende firmaer til at udvikle et kommercielt produkt til beregning af omkostningerne ved fouling, men der er blevet udviklet en funktionsdygtig prototype i projektet, hvorved grundlaget for et egentligt kommercielt produkt er blevet udviklet, og Grundfos Management samt JCI overvejer en fremtidig kommercialisering af resultaterne i form af et egentligt produkt.

I forhold til at kunne kvantificere omkostningerne forbundet med reduceret varmeveksler-effektivitet vil produktets anvendelighed være afhængig af, hvor præcist brugeren kender det system, som varmeveksleren indgår i. Projektet har vist, at der er et stort behov og stigende efterspørgsel efter dette produkt, som vil kunne sikre virksomhederne en væsentligt forbedret energiudnyttelse i deres varmevekslersystemer.

11.2 Samlet vurdering af vandanalyserne

Analyser af fouling på forskellige køleflader har vist store forskelle i belægningssammensætningen og -tykkelsen. Indvirkningen på varmeoverførslen var derfor afhængig af, om belægningerne overvejende var organiske, inklusiv biofilm, eller uorganisk bestanddele. Det vil være biofilm og organisk slam, der pga. højt vandindhold teoretisk vil give den højeste reduktion i varmeoverførslen. Detaljeret analyse af belægninger på vekslerplader giver således værdifuld information om, hvorledes rengøring (CIP) af vekslerpladen kan optimeres mod den specifikke belægning, samt hvorledes vandbehandlingen vil kunne forbedres, så belægningsdannelsen minimeres for at mindske energitabet. Herudover vil biofilmanalyser på vekslerplader kunne angive potentiel vækst og spredning af *Legionella* i et givent køle-anlæg.